

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y
TEORÍA DE ESTRUCTURAS

TRABAJO FIN DE GRADO

“Optimización de la disposición de airbags para el empaquetamiento de una botella de vidrio”

Autor: Francisco Gómez Silva

Tutor: Ramón Eulalio Zaera Polo

GRADO UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA MECÁNICA

LEGANÉS, MADRID

JULIO-2018



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

Índice

Índice	3
Lista de figuras	7
Lista de tablas	11
Lista de ecuaciones	13
Agradecimientos	15
Resumen	17
Abstract	19
1. Introducción.....	21
1.1. Motivación	21
1.2. Objetivos	23
1.3. Estructura del documento.....	24
2. Antecedentes	25
2.1. Conceptos	25
2.2. Clasificaciones de sistemas de empaquetamiento	25
2.2.1. Clasificación de los empaques según sus características	25
2.2.2. Clasificación de los empaques según el material con el que están fabricados.	26
2.2.3. Clasificación de los empaques según el producto empaquetado	28
2.3. Protección mediante relleno	32
2.4. Empaquetamiento de botellas de vidrio	38
2.4.1. Sistemas de empaquetamiento generales de botellas	38
2.4.2. Sistemas de empaquetamiento tolerantes a impactos	41
3. Metodología	45
3.1. Método de los Elementos Finitos (MEF)	45
3.2. Régimen no lineal	48
3.3. Abaqus®.....	49
3.3.1. Solver implícito	49
3.3.2. Solver explícito	50
3.4. Teoría de amortiguación.....	51
3.5. Variable de comparación.....	54
3.6. Velocidad inicial	54
3.7. Energías en modelos de elementos finitos.	55
3.8. Experimentos.....	57
4. Descripción del modelo de Elementos Finitos.....	59
4.1. Geometría, material y peso.....	59

4.1.1. Botella	59
4.1.2. Airbags	62
4.1.3. Suelo	65
4.2. Disposición	65
4.3. Mallado y tipos de elementos	67
4.3.1. Elementos hexaédricos tridimensionales	67
4.3.2. Elementos tetraédricos tridimensionales	68
4.3.3. Elementos tipo membrana	68
4.3.4. Análisis de malla	69
4.4. Ligaduras y contactos	71
4.5. Cavidad fluida	72
4.6. Asignación de la velocidad	73
4.7. Step	74
4.8. Postproceso	74
4.8.1. Desplazamientos y tensiones	75
4.8.2. Aceleraciones	76
4.8.3. Fuerzas	78
4.8.4. Área total de contacto	80
5. Análisis de resultados	81
5.1. Modelo 1	81
5.1.1. Experimento 1 (Modelo 1)	82
5.2. Modelo 2	84
5.2.1. Experimento 1 (Modelo 2)	85
5.2.2. Experimento 2 (Modelo 2)	88
5.2.3. Experimento 3 (Modelo 2)	89
5.2.4. Experimento 4 (Modelo 2)	90
5.3. Modelo 3	91
5.3.1. Experimento 1 (Modelo 3)	92
5.3.2. Experimento 2 (Modelo 3)	93
5.4. Modelo 4	94
5.4.1. Experimento 1 (Modelo 4)	95
5.4.2. Experimento 2 (Modelo 4)	97
5.5. Modelo 5	97
5.5.1. Experimento 1 (Modelo 5)	98
5.5.2. Experimento 2 (Modelo 5)	99
5.6. Modelo 6	100
5.6.1. Experimento 1 (Modelo 6)	101

5.6.2. Experimento 2 (Modelo 6)	102
5.7. Modelo 7	103
5.7.1. Experimento 1 (Modelo 7)	104
5.7.2. Experimento 2 (Modelo 7)	106
5.8. Modelo 8	107
5.8.1. Experimento 1 (Modelo 8)	107
5.8.2. Experimento 2 (Modelo 8)	108
5.9. Modelo 9	109
5.9.1. Experimento 1 (Modelo 9)	109
5.10. Modelo 10	110
5.10.1. Experimento 1 (Modelo 10)	111
5.10.2. Experimento 2 (Modelo 10)	112
5.10.3. Experimento 3 (Modelo 10)	112
6. Marco regulador.....	115
6.1. Propiedad intelectual de la idea.....	115
6.1.1. Requisitos de patentabilidad.....	115
6.1.2. Documentación necesaria para presentar la solicitud.....	116
7. Entorno socioeconómico	117
7.1. Entorno económico	117
7.2. Entorno social.....	118
7.3. Impacto medioambiental	118
7.4. Plan de explotación	119
7.5. Planificación.....	120
7.6. Presupuesto	121
7.6.1. Horas empleadas	121
7.6.2. Costes	123
8. Conclusiones y trabajos futuros.....	125
8.1. Conclusiones	125
8.2. Trabajos futuros	127
8.2.1. Mejora de la gestión de apilado.....	127
8.2.2. Contenedores para botellas.....	127
ANEXO I: DIAGRAMA DE GANTT	129
REFERENCIAS	131

Lista de figuras

Figura 1.1: Consumo actual de botellas de plástico.....	22
Figura 2.1: Ejemplo de clasificación según las características del empaque.	26
Figura 2.2: Esquema empaquetado con gel.	29
Figura 2.3: Empaquetado de semilleros.....	30
Figura 2.4: Elementos aceptables para empaquetamiento de muestras clínicas.	31
Figura 2.5: Empaque de una batería con electrolito.....	32
Figura 2.6: Film de espuma.	34
Figura 2.7: Protecciones personalizadas con espuma de: Poliestireno (a), poliuretano (b) y espuma antiestática (c).	35
Figura 2.8: Cartón de nido de abeja.	36
Figura 2.9: Espuma expandible.....	37
Figura 2.10: Sistema TotalSafePack.	39
Figura 2.11: Malla tubular de espuma en rollo (a) y protección tubular de cartón (b).	39
Figura 2.12: Contenedor de poliestireno.....	40
Figura 2.13: Placas de corcho.	41
Figura 2.14: Vinibag, planta y perfil.....	42
Figura 2.15: Wineskin.....	43
Figura 2.16: Airbags (Bolsas de aire).	43
Figura 3.1: Ejemplo de mallado.....	45
Figura 3.2: Mapeo en elementos 3D.	47
Figura 3.3: Método de cálculo implícito.....	50
Figura 3.4: Sistema de amortiguación.....	51
Figura 3.5: Curvas aceleración-tiempo para distintos valores de β , amortiguación no lineal..	53
Figura 3.6: Variación de la aceleración máxima respecto a la cantidad de amortiguamiento ..	53
Figura 3.7: Variación de la energía con el tiempo en uno de los modelos.....	56
Figura 4.1: Sección botella.	60
Figura 4.2: Construcción airbags. (a) Conjunto inicial. (b) Parte inicial. (c) Corte airbag longitudinal. (d) Airbag longitudinal. (e) Corte airbag superior. (f) Airbag inferior.	63
Figura 4.3: Comportamiento del polietileno.	64
Figura 4.4: Disposición de los airbags.	66
Figura 4.5: Vista del modelo cortado.....	66
Figura 4.6: Elemento C3D8R.	68
Figura 4.7: Análisis de malla.	70
Figura 4.8: Contacto tipo “Penalty”.....	72

Figura 4.9: Velocidad (m/s).....	73
Figura 4.10: Secuencia de impacto.	75
Figura 4.11: Tensiones de Von Mises del conjunto.....	76
Figura 4.12: Golpes con el suelo. (a) Visualización de los dos golpes mediante picos en la aceleración de la botella en el eje “y” (ACOM2). (b) Tensiones provocadas por el primer golpe. (c) Tensiones provocadas por el segundo golpe.....	77
Figura 4.13: Aceleraciones sufridas por la botella (ACOM1 en el eje “x”, ACOM2 en el eje “y” y ACOM3 en el eje “z”)......	77
Figura 4.14: Fuerzas normales (CFN1 en el eje “x”, CFN2 en el eje “y” y CFN3 en el eje “z”)..	78
Figura 4.15: Comparación de CFN2 (fuerza normal en el eje “y”) con las fuerzas tangenciales (CFS1 en el eje “x”, CFS2 en el eje “y” y CFS3 en el eje “z”)......	79
Figura 4.16: Relación entre el módulo de las fuerzas en el eje “y” (CFT2) y las aceleraciones de la botella en el eje “y” (ACOM2).....	79
Figura 4.17: Relación entre área de contacto (CAREA) y las aceleraciones de la botella en el eje “y” (ACOM2).....	82
Figura 5.1: Modelo 1.	82
Figura 5.2: Variación de la aceleración con la presión dependiendo del espesor (Modelo 1)...	84
Figura 5.3: Espesor de las cavidades en el modelo 2.....	85
Figura 5.4: Orientación del experimento 1 (Modelo 2).	85
Figura 5.5: Variación de la aceleración con la presión (Modelo 2, experimento1).	86
Figura 5.6: Comprobación de contacto entre botella y suelo.....	87
Figura 5.7: Orientación del experimento 2 (Modelo 2).	88
Figura 5.8: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 2 del modelo 2.	88
Figura 5.9: Aumento del área de contacto airbags-suelo (a) Para $t = 0.0008s$. (b) Para $t = 0.0011s$	89
Figura 5.10: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 3 del modelo 2.	90
Figura 5.11: Orientación del experimento 4 (Modelo 2).	91
Figura 5.12: Modelo 3.....	91
Figura 5.13: Variación de la aceleración con la presión (Modelo 3, experimento1).	92
Figura 5.14: Comparación de arcos y huecos. (a) Modelo 2. (b) Modelo 3.	93
Figura 5.15: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 2 del modelo 3.	94
Figura 5.16: Modelo 4.....	95
Figura 5.17: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 1 del modelo 4.	97
Figura 5.18: Modelo 5.....	98
Figura 5.19: Campo de tensiones en el Modelo 5 (20 KPa).	100

Figura 5.20: Modelo 6. (a) Perfil. (b) Planta 1. (c) Planta 2.	101
Figura 5.21: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 1 del modelo 6.	102
Figura 5.22: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 2 del modelo 6.	102
Figura 5.23: Sección airbag tipo “aro” modelo 7 (m).	103
Figura 5.24: Modelo 7.	104
Figura 5.25: Variación de la aceleración con la presión dependiendo del espesor (Modelo 7, experimento 1).	105
Figura 5.26: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 1 del modelo 7.	106
Figura 5.27: Campo de tensiones en el Modelo 7 (10 KPa).	106
Figura 5.28: Comparación de arcos y huecos. (a) Modelo 7. (b) Modelo 8.	107
Figura 5.29: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 1 del modelo 8.	108
Figura 5.30: Modelo 9.	109
Figura 5.31: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 1 del modelo 9.	110
Figura 5.32: Modelo 10.	111
Figura 5.33: Sección airbag tipo “aro” Modelo 10 (m).	111
Figura 5.34: Campo de tensiones (Modelo 10, experimento 2).	112
Figura 7.1: TACC del sector de packaging de los últimos años en España (€MM), [33].	117

Lista de tablas

TABLA 4.1: PROPIEDADES DEL VIDRIO.....	60
TABLA 4.2: ACELERACIONES MÁXIMAS DEPENDIENDO DE LA BOTELLA.....	62
TABLA 4.3: PROPIEDADES DEL POLIETILENO.....	64
TABLA 4.4: VALORES DEL ANÁLISIS DE MALLA.....	70
TABLA 4.5: ANALISIS DE LA MALLA DE LA BOTELLA.....	71
TABLA 4.6: PROPIEDADES DEL AIRE.....	73
TABLA 5.1: INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN LA ACELERACIÓN; MODELO 1 (0.1MM DE ESPESOR).....	82
TABLA 5.2: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 1 (2MM DE ESPESOR).....	83
TABLA 5.3: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 2 (EXPERIMENTO 1).....	86
TABLA 5.4: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 3 (EXPERIMENTO 1).....	92
TABLA 5.5: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 4 (EXPERIMENTO 1).....	95
TABLA 5.6: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 4 (EXPERIMENTO 1) CON UN ESPESOR DE 0.5MM.....	96
TABLA 5.7: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 4 (EXPERIMENTO 1).....	99
TABLA 5.8: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 7 (EXPERIMENTO 1).....	104
TABLA 5.9: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 10 (EXPERIMENTO 1).....	112
TABLA 7.1: DAFO DEL SISTEMA DE EMPAQUETAMIENTO MEDIANTE AIRBAGS.	120
TABLA 7.2: TAREAS LLEVADAS A CABO Y HORAS EMPLEADAS.....	122
TABLA 7.3: COSTES DE AMORTIZACIÓN.....	123
TABLA 7.4: COSTES DE PERSONAL.....	124

Lista de ecuaciones

(3.1) 46

(3.2) 46

(3.3) 47

(3.4) 47

(3.5) 48

(3.6) 48

(3.7) 48

(3.8) 49

(3.9) 49

(3.10) 50

(3.11) 50

(3.12) 51

(3.13) 51

(3.14) 51

(3.15) 52

(3.16) 52

(3.17) 52

(3.18) 52

(3.19) 52

(3.20) 52

(3.21) 52

(3.22) 53

(3.23) 55

(3.24) 55

(4.1) 61

(4.2) 62

(4.3) 64

(7.1) 123

(7.2) 124

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi tutor Ramón Eulalio Zaera por su ayuda y su atención durante toda la realización de este proyecto y por facilitarme los conocimientos sobre las herramientas empleadas, los cuales considero interesantes y útiles en trabajos y proyectos futuros.

Agradecer los ánimos recibidos por parte de mis amigos, tanto a los que llevan a mi lado desde pequeño como a los que han llegado durante estos años.

A mi familia, por su apoyo e interés en todo momento. Dar las gracias a una de las personas que más me ha apoyado desde pequeño y que ha sido un pilar de apoyo fundamental durante esta etapa de mi vida, mi hermana María.

Por último, muchas gracias papá y mamá, por guiarme y apoyarme en todas mis decisiones, por toda la paciencia que habéis tenido y por buscar siempre mi felicidad antes que nada.

Resumen

En la actualidad, el planeta se encuentra en una situación medioambiental crítica, siendo cada año mayor la cantidad de plásticos vertidos a los océanos, provocando la muerte de su flora y fauna. Cada día son más las campañas realizadas con la intención de concienciar a la población de esta situación, promoviendo la reducción de los plásticos utilizados. Una de estas campañas, cuyo lema es “el envase más sostenible es eliminar el envase”, promueve la reutilización de los envases, sobre todo en el sector alimentario ya que es uno de los que más envases desecha a diario. Se debe tener precaución a la hora de reutilizar envases que contacten directamente con los alimentos, debido a que hay materiales cuya repetida utilización provoca la transferencia de sustancias perjudiciales para la salud hacia dichos alimentos. El material más adecuado para este cometido es el vidrio, al presentar buenas propiedades para contener alimentos, siendo el único inconveniente su fragilidad. Para evitar la pérdida de los productos envasados en vidrio en caso de recibir algún golpe, se emplean distintos sistemas de protección que ocupan bastante espacio, repercutiendo en los costes de transporte de las empresas. Existe un tipo de sistema de empaquetamiento mediante bolsas de aire o airbags, el cual proporciona protección a los envases que empaqueta, ocupando poco espacio. Hasta ahora se emplean modelos de airbags, estandarizados y compatibles con envases de varios tamaños y geometrías. Uno de los principales factores que influyen en la protección de estos envases es su geometría, por lo que un mismo conjunto de airbag no puede asegurar la protección de todos los tipos de envases.

En este proyecto se estudia la optimización de un sistema de airbags personalizado para proteger una botella de vidrio, empleando una herramienta de diseño basada en el método de cálculo de los elementos finitos, llamada Abaqus®. Se proponen varios casos, obteniendo patrones de comportamiento que facilitan la continuación del estudio de este tipo de sistema de empaquetamiento. Se detectan los parámetros de los airbags que más influyen en la protección de la botella, explicando como lo hacen. El fin de este proyecto es contribuir en el estudio de este tipo de sistemas de empaquetamiento, con la intención de que finalmente se implanten en empresas, que substituyan los envases de plástico por otros de vidrio, destinando el uso del plástico únicamente a la fabricación de los airbags protectores. La cantidad de plástico empleado en la fabricación de estos airbags es mucho menor que la empleada para la fabricación de envases, contando, además, con la posibilidad de reutilizar dichos airbags.

Se ha llegado a diseñar varios modelos satisfactorios que presentan resultados excelentes y se han obtenido conclusiones que facilitan el diseño de modelos futuros, sabiendo que factores hay que considerar y como se tienen que utilizar en el proceso de diseño.

Abstract

Nowadays, our planet is dealing with a critical environmental situation since every year, the quantity of plastic delivered to the ocean is larger, causing the death of its fauna and flora. Every day, more campaigns are meant to aware people about this situation, boosting the reduction of used plastic. One of these campaigns, whose slogan is “the most sustainable packing is no packing”, encourages to reuse the packings, especially, in the food industry, since it is one of the sectors that most wastes packing daily. Caution is needed when reusing packings that are in direct contact with food, because of the existence of materials whose repeated use causes the transfer to the food of substances that are harmful to the health. The most suitable material for that is glass since it owns good properties at containing food, with the only drawback of being fragile. In order to avoid losing the product contained in a glass packing in case it suffers an impact, different protections systems are employed, which occupy quite amount of space, consequently affecting on the companies’ transport costs. There is a type of packaging system by airbags, which provide protection to the packings, occupying few space. Until now, standard airbags models, which are compatible with several sizes and geometries, have been employed. One of the main influent factors in the packings protection is their geometry, so a single airbags set cannot ensure the protection of all the types of packings.

This project studies the optimization of a customized airbag system to protect a glass bottle, by using a design tool, called Abaqus®, which is based on the Finite Element Method. Several cases are proposed, from which behavioural patterns are obtained, which ease the further study of this type of packaging systems. The most influent parameters in the bottle protection are detected, and the way in which they do is explained. the goal of this project is to contribute to the study of this type of packaging systems, with the purpose of being implanted into companies, in order to substitute plastic packings by glass ones, so that the plastic is used only in the manufacturing of the protective airbags. The quantity of plastic that it requires is much lower than that used to manufacture plastic packings, considering also the possibility of reusing such airbags.

Several satisfactory models have been designed, which present excellent results, and some conclusions have been obtained to ease the design of future models, knowing the factors to be considered and the way in which they must be used in the design process.

1. Introducción

El contenido del presente informe expone el estudio realizado sobre la optimización de la disposición de airbags en el empaquetamiento de una botella de vidrio. Se han analizado distintos airbags, variando ciertos parámetros, comprobando cómo influyen dichas variaciones en la protección de la botella. La motivación que ha llevado a desarrollar este proyecto se introduce a continuación, además de los objetivos establecidos para el mismo, de acuerdo al marco regulador (capítulo 6) socioeconómico (capítulo 7) en el que se emplea.

1.1. Motivación

Desde su expansión a principios del siglo pasado, el plástico está siendo el material por excelencia en la actualidad. Gran cantidad de ventajas lo hacen atractivo para todo tipo de usos cotidianos. Se trata de un material barato, resistente y versátil, de alta manejabilidad a la hora de elaborar productos con multitud de formas. Todo esto lleva a la industria a utilizarlo como primera alternativa a la hora de empaquetar y transportar sus productos.

Todas estas ventajas a su vez hacen que la utilización de este material sea uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la sociedad ahora mismo. Se usa este continuamente, sin miedo a deshacernos de él debido a su bajo coste.

Se estima que hasta la fecha se han producido 8.300 millones de toneladas de plástico virgen, de las cuales 6.300 millones han pasado a ser residuos plásticos. De estos solo un 9% ha sido reciclado, quedando un 12% eliminado mediante incineración, contribuyendo al aumento del dióxido de carbono, CO_2 , en la atmosfera y un 79% acumulado en vertederos y entornos naturales. El estudio presentado en [1] afirma que, si seguimos actuando de este modo, en el año 2050 serán 12.000 millones de toneladas de residuos plásticos las acumuladas en nuestros vertederos y medio ambiente.

Las botellas de plástico constituyen una gran parte de estos desechos ya que sus cifras de consumo son enormes como muestra la figura 1.1 publicada en la revista BBC [2].

Este problema, cada día, más grave, tiene que ser enmendado de alguna forma, lo que puede llevar en el futuro a imponer impuestos o tasas por la utilización de plásticos para fomentar y obligar a las industrias a utilizar otro tipo de material. Una alternativa a éste es el empleo del vidrio. Éste es un material 100% reciclable, además de reutilizable ya que muchos envases pueden ser lavados y usados de nuevo con el mismo fin. Además, el vidrio está constituido por materiales extraídos de las minas de arenas que son abundantes en nuestro planeta y su extracción es sencilla por lo que no implica procesos contaminantes. La única contaminación posible es la de erosión al explotar estas minas, la cual se evita controlando su extracción. Su degradación es muy lenta pero no desprende ningún tipo de sustancia perjudicial para el medio ambiente.

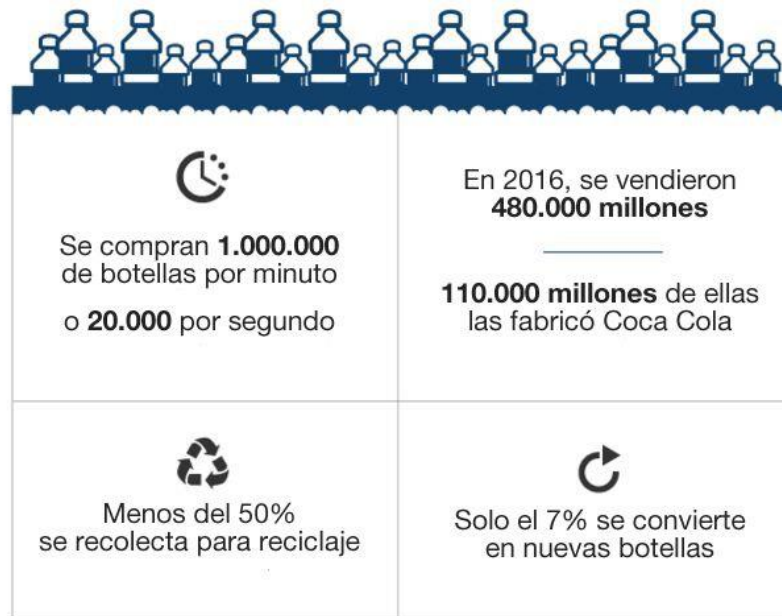


Figura 1.1: Consumo actual de botellas de plástico, [2].

Si se habla desde el punto de vista de la salud, el vidrio es un material limpio e higiénico que no interfiere con las propiedades de los alimentos que contiene, mientras que el plástico sí, además, son muchas las marcas que recomiendan no reutilizar sus botellas por estar fabricadas con plástico. Los envases de vidrio cerrados son completamente herméticos y además proporcionan al producto que contienen un cierto atractivo que puede ser utilizado por las empresas como estrategia de marketing.

El estudio “Glass vs. Plastic: Affective Judgments of Food Packages After Visual and Haptic Exploration” realizado en 2015 por S. Balzarotti, B. Maviglia, F. Biassoni y M. R. Ciceri somete a varios sujetos a pruebas para valorar la diferencia de agrado de la población entre el uso de vidrio y de plástico para envasar alimentos.

El estudio, [3], consistió en la examinación de las opiniones y el juicio afectivo de 30 individuos después de la exploración háptica y visual de distintos envases. Se utilizaron tres alimentos que usualmente son envasados en vidrio, vino, miel y crema de chocolate y cinco envases distintos para estos. Uno de vidrio, uno de plástico transparente con geometría similar al de vidrio, uno de plástico con la misma forma, pero opaco, por lo que no deja ver el producto de su interior, uno de plástico transparente, pero con una forma distinta a los anteriores y uno de plástico con forma muy inusual. Se hicieron tres grupos con los individuos sometidos a pruebas visuales, hápticas y visuales más hápticas. Las pruebas visuales consistían en la exposición de los envases ante los individuos mientras se registraban los movimientos oculares de estos, mientras que los otros dos grupos valoraban su satisfacción y la calidad de cada producto puntuándolos. Los resultados de las pruebas visuales reflejaban que son más vistosos y llaman más la atención los productos que muestran el contenido a través de su envase destacando entre estos los de vidrio por encima de los de plástico. Los otros dos grupos consideraron de

mayor calidad los alimentos envasados en cristal pensando que estos alimentos eran distintos dependiendo de su envase. Para las formas inusuales se necesitó un estudio más complejo, pero finalmente se clasificaron como menos agradable y su contenido se suponía de menor calidad.

Se puede observar que el uso del vidrio aparte de ser mucho más respetuoso con el medio ambiente y menos perjudicial para la salud resulta atractivo para la población a la hora de contener alimentos, lo que implica una ventaja de negocio.

Debido a estas razones es muy posible que cada vez sean más las empresas que se sumen al uso del vidrio para envasar sus productos, descartando definitivamente el plástico.

Uno de los mayores inconvenientes de la fabricación de envases en vidrio es el riesgo de rotura en su transporte debido a su fragilidad. Hasta ahora, la mayoría de las empresas que trabajan con este material transportan sus productos en cajas de cartón que facilitan el transporte de varios productos a la vez. El tipo de cartón más utilizado es el cartón corrugado, debido a su absorción de energía en caso de impacto. En el caso del vidrio esta absorción no es suficiente para evitar la rotura por lo que en ocasiones interesa introducir entre los envases algún material que la aumente, aunque ocupe espacio, aumentando los costes de transporte. Normalmente se introducen en las cajas junto a los envases papel arrugado, poliespán o pequeñas bolsas de aire, siendo este último método el más efectivo. Existen multitud de formas de colocar estos materiales alrededor de los envases dependiendo de su forma y del grado de protección que se quiera aportar, pero siempre se usa más material del necesario por seguridad, malgastando éste, además de incrementar los costes debidos al transporte.

Por esto, es interesante estudiar el uso de pequeñas bolsas de polietileno con aire en su interior (airbags), unidos entre sí de forma que constituyan una envoltura adaptada a cada envase. Se trata de una protección individualizada y diseñada para cada tipo de envase, lo cual lo hace reutilizable siempre y cuando se trabaje con la misma geometría. Es importante considerar el hecho de que sea reutilizable, ya que se pretenden disminuir los desechos plásticos. Este tipo de protección resulta provechoso en sectores cuyos envases tengan siempre la misma forma, consiguiendo así la seguridad de estos en su transporte con el mínimo uso de material y disminuyendo los costes de transporte lo máximo posible.

Por estas razones, se ha llevado a cabo un estudio de optimización de la disposición de estos airbags, cuyo desarrollo y resultados se exponen en la presente memoria.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de la disposición de bolsas de aire o airbags, empleadas como empaquetamiento protector de una botella de vidrio. Se trata de proteger dicha botella, evitando que toque el suelo si se cae durante su traslado.

Una vez se consiga que la botella no entre en contacto con el suelo se estudian diferentes parámetros de estos airbags, con la intención de obtener patrones de comportamiento y conocer que factores influyen en la mejora de su protección. Para conseguir estos patrones

se realizan varias simulaciones, mediante el software Abaqus®, en las que una botella (idéntica en todas las simulaciones), cubierta por distintos airbags impacta con el suelo a una determinada velocidad. En cada simulación se variarán distintos parámetros de estos airbags, con el objetivo de conocer en qué medida influyen en la protección de la botella. Los parámetros que se va estudiar son la geometría de los airbags, su presión interior y el espesor de airbag utilizado. Para evaluar el grado de protección de la botella se comparan las aceleraciones máximas que el impacto provoca sobre ella.

Para lograr este objetivo principal, antes hay que conseguir otros que, además, resultan de gran importancia para obtener un estudio valioso. Antes de comenzar con las simulaciones es necesario aprender a utilizar el software empleado, consiguiendo la experiencia suficiente para resolver los distintos problemas que puedan aparecer cuando se simulen los casos que se pretenden estudiar. Para modelar las piezas definitivas, se prueban distintas simplificaciones, con la intención de reducir el tiempo computacional y comprobar que estas simplificaciones sean adecuadas y no provoquen resultados erróneos, comparando y analizando los valores y comportamientos obtenidos.

1.3. Estructura del documento

El resto del documento se estructuran de la siguiente forma. El segundo capítulo trata los distintos sistemas de empaquetamiento empleados hasta ahora, comenzando por clasificaciones generales y acabando con los utilizados para la protección de botellas. En el tercero se exponen las herramientas usadas en la realización del proyecto y los métodos de cálculo en los que se basan. En el capítulo cuatro, se describe el tipo de modelo utilizado en las simulaciones y la forma de obtener los resultados, empleando como ejemplo el primer modelo creado. Los distintos modelos estudiados, junto a los resultados obtenidos en cada uno de ellos se exponen en el quinto capítulo. En los capítulos seis y siete se habla del marco regulador y del entorno socioeconómico en el que se aplicaría este proyecto respectivamente. Además, en el capítulo siete se incluye la planificación y el presupuesto detallado del estudio. Por último, en el capítulo ocho se exponen las conclusiones obtenidas, los objetivos cumplidos y algunas propuestas que se pueden realizar en trabajos futuros.

2. Antecedentes

El sector del transporte de mercancías, y con el de los sistemas de empaquetamiento, evoluciona constantemente, buscando en todo momento la seguridad de los productos transportados con el menor coste posible. Son muchos los sistemas de empaquetamiento utilizados, dependiendo de sus fines, de los productos que contienen, del presupuesto disponible para su fabricación, etc. En este capítulo se habla de algunos de los sistemas empleados hasta ahora, mostrando sus ventajas e inconvenientes y los posibles usos que se le pueden dar.

2.1. Conceptos

En primer lugar, es necesario aclarar una serie de conceptos que normalmente causan confusión y son necesarios para comprender adecuadamente en qué consisten los métodos de empaquetado y transporte de productos.

- Envase: recipiente que contiene el producto a transportar. Mantiene contacto directo con éste y se encarga de protegerlo.
- Empaque: sistema que contribuye a la protección del envase. Hay productos que carecen de éste o el mismo envase hace las funciones de éste, por eso es fácil cometer el error de hablar de empaque cuando se quiere hacer referencia al envase. Este error se produce también porque en cuestiones de marketing queda mejor hablar de “packaging” o “envase” que de empaque.
- Embalaje: éste se refiere a la forma de envolver o apilar varios productos para su correcto transporte. Existen multitud de tipos de embalaje dependiendo de los productos y de si estos pueden o no tocarse entre ellos. Es normal hablar de embalaje incluyendo en éste el empaque sin percibir diferencia entre ellos.

2.2. Clasificaciones de sistemas de empaquetamiento

Existen varias formas de clasificar los sistemas de empaquetamiento. Lo más normal es clasificarlos atendiendo a sus empaques. A continuación, se habla de las clasificaciones según las características o el material del empaque. También resulta interesante mencionar algunos sistemas de empaquetamiento especiales para los productos que contienen.

2.2.1. Clasificación de los empaques según sus características

Como norma general los empaques se pueden clasificar en cuatro grupos, dependiendo de sus características como se ilustra en el ejemplo de la figura 2.1, [4]:

- Empaque primario: es el envase o recipiente que contiene el producto que se quiere empaquetar. Está en contacto directo con él y se encarga de preservarlo y mantener sus propiedades.

- Empaque secundario: contiene al empaque primario y contribuye en su protección o le atribuye cierto atractivo utilizado como estrategia de marketing. También proporciona al envase una mayor facilidad de manipulación a la hora de moverlo y colocarlo en los distintos estantes de su punto de venta. Este empaque puede separarse del producto sin afectar a sus propiedades.
- Empaque terciario: puede agrupar varios empaques primarios o secundarios para facilitar su transporte y manipulación.
- Unidad de carga: esta está compuesta por empaques terciarios. Los apila de forma que facilita el transporte de grandes cantidades de mercancía y ahorra espacio de almacenamiento una vez que estas son guardadas para su posterior venta.

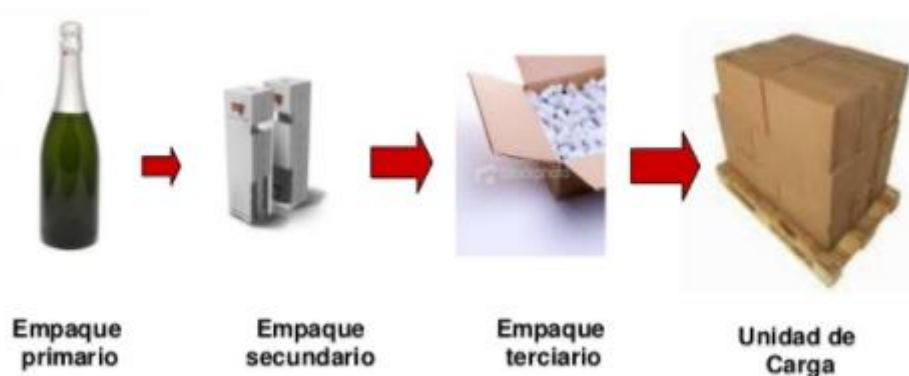


Figura 2.1: Ejemplo de clasificación según las características del empaque, [4].

2.2.2. Clasificación de los empaques según el material con el que están fabricados.

Otro tipo de clasificación usual es en función del material principal del que se compone el empaquetamiento.

- Madera: estos pueden utilizarse para contener todo tipo de productos, con diferentes tamaños y geometrías, pero se suelen utilizar para el transporte de grandes cargas y de comercios internacionales por su robustez. Se trata de un material muy rígido, por lo que sirve para el transporte de productos frágiles siempre y cuando estos estén debidamente colocados en su interior, con la intención de evitar choques que lleven a la rotura. Por lo tanto, usando un empaque secundario que consiga que estos productos estén apilados de forma apropiada, pueden servir tanto como empaque terciario, como directamente como unidad de carga ya que podemos conseguir estructuras grandes y resistentes para transportar toda la mercancía. Una última característica que considerar es que estos empaques son reutilizables, ayudando a frenar el derroche de recursos.

El problema es que, al ser muy voluminosos, estos ocupan mucho espacio, aunque estén vacíos una vez transportada la mercancía. Además, la madera es un material

con necesidad de un tratado especial para su conservación y su montaje es laborioso aumentando así su coste.

- Cartón: se trata del más utilizado hoy en día debido a su elevado número de ventajas. Se trata de un material seguro, de gran manejabilidad y económico. Se adapta fácilmente a las necesidades del producto adoptando numerosas geometrías. Otra de las ventajas que lo hacen interesante es que el cartón, aunque difícilmente reutilizable, es un material biodegradable, por lo que no produce un gran impacto medioambiental.

El mayor problema de este tipo de empaque llega a la hora de transportar productos grandes ya que el cartón no es lo suficientemente resistente para ello. Por lo tanto, puede usarse como empaque secundario y terciario. Productos que no necesitan adornar su envase prescinden de empaque secundario y utilizan este material como terciario introduciendo en el mismo, además, distintos tipos de materiales para proporcionarles protección, como pueden ser papel de burbujas, poliespán, bolsas de aire, etc.

- Plástico: es un material muy utilizado por ser resistente y práctico, pero cada día está más penalizado por su coste. Cada vez son más las estrategias impuestas para reducir su uso ya que, aun siendo un material reciclable, contribuye severamente a la contaminación medioambiental. Este material se utiliza mayormente para la fabricación de empaques primarios o envases, aunque cada vez son más las empresas que lo utilizan para la elaboración de métodos de protección en el transporte de sus productos cuando estos son frágiles. Se trata de bolsas de aire con distintas tipologías, encargadas de absorber la energía producida por un posible impacto.

- Vidrio: al igual que el anterior, se emplea en la fabricación de envases que están en contacto directo con el producto a empaquetar. Una de las grandes propiedades del vidrio, con respecto a la protección de productos, es que este no desprende ningún tipo de sustancia, manteniendo el producto con sus propiedades iniciales durante largos periodos de tiempo, al contrario que el plástico.

La desventaja del vidrio es que necesita más empaques para su transporte por su fragilidad.

- Metales: se emplean básicamente en dos tipos de empaques. Como empaque primario, son muchos los productos contenidos en latas, tanto líquidos como sólidos y como unidad de carga, existen los “contenedor”, usados en transportes internacionales de grandes cantidades de mercancías. Estos presentan ventajas similares a los contenedores de madera, como la robustez y resistencia, así como su alta reutilización, que los convierte en un método de empaque sensible con el medioambiente. No es así lo que ocurre con los envases producidos con este material, que no son reutilizables y al tratarse de un material no biodegradable se suma a los múltiples desechos que se producen cada día. Desde el punto de vista

de la salud, se trata de un material oxidable y que interacciona con los productos con los que está en contacto directo.

2.2.3. Clasificación de los empaques según el producto empaquetado

Existen distintos productos que necesitan un empaquetamiento especial, debido a sus propiedades o sensibilidad. A continuación, se enumeran algunos, explicando cómo se lleva a cabo su empaquetamiento correctamente [5].

Productos perecederos

El objetivo principal a la hora de empaquetar productos de este tipo es mantenerlos a baja temperatura durante su transporte para conservar sus propiedades. Si no se dispone de vehículo frigorífico especial para mantener la temperatura de estos, existen distintos tipos de empaquetamiento con los que se puede conseguir.

- Refrigerantes en gel: consisten en pequeñas bolsas rellenas de gel, que una vez congelado mantiene su baja temperatura durante largos periodos de tiempo. Es uno de los más recomendados por no desprender agua, que puede deteriorar otras partes del empaque, y por ser reutilizable ya que solo hay que volver a congelar las bolsas una vez se hayan usado.

Para emplear este tipo de empaquetamiento, necesitamos además otros elementos. Un contenedor aislante el cual es recomendable refrigerar antes de realizar el empaquetamiento, si es posible. En este se introduce el producto junto a las bolsas de gel y bolitas de relleno para proporcionar sujeción. Si se trata de productos que puedan contener líquidos, se envuelve el producto junto a las bolsas de gel en una bolsa de plástico hermética con almohadillas absorbentes. Por último, el contenedor se introduce en una caja de cartón corrugado para obtener mayor protección., como se puede observar en el esquema de ejecución mostrado en la figura 2.2, [5].

- Hielo seco: el método de empaquetamiento es similar al anterior, pero se deben tener ciertas precauciones ya que se trata de una sustancia peligrosa en algunos aspectos. Es importante evitar presiones altas en el empaquetado y no introducir el hielo seco en un contenedor hermético ya que puede explotar debido a su contenido de dióxido de carbono. Dicho material también puede ocasionar envenenamiento por respiración así que es conveniente una buena ventilación en las zonas de uso. El hielo seco tiene una temperatura superficial de menos de -78.5°C , lo que puede producir quemaduras en la piel. Por esto hay que tener precaución en su manipulación, llevándola a cabo con guantes aislantes. A parte de tomar precauciones por salud, hay que tener en cuenta que el hielo seco puede dañar los productos transportados si entra en contacto directo con ellos [6].
- Hielo tradicional: en este método se usa introduciéndolo en pequeñas bolsas selladas. Su método de utilización sigue el mismo esquema que los anteriores, pero

en este caso siempre se emplea algún tipo de material absorbente como pueden ser bolitas de celulosa, toallas de papel o almohadillas. Así se evita el deterioro de los productos o el empaque debido a la humedad.



Figura 2.2: Esquema empaquetado con gel.

Flores y plantas

Como norma general se recomiendan una serie de puntos a tener en cuenta a la hora de transportar este tipo de productos. Se trata de conseguir que las plantas se mantengan estables durante el transporte ya que no se puede asegurar que, durante éste, las plantas lleven siempre la orientación deseada. Para ello se utilizan distintos elementos de sujeción como pueden ser planchas de cartón. Además, se recomienda colocar el etiquetado en la parte superior de la caja para así evitar, en la medida de lo posible, los cambios de orientación no deseados.

Los contenedores o floreros no pueden contener agua en su transporte. Un derrame o una pérdida de agua puede filtrarse y causar problemas de seguridad o el deterioro de algunos materiales. A continuación, se mencionan algunos tipos de planta las cuales necesitan de un empaquetado especial:

- Plantas de cepellón: estas son plantadas en semilleros individuales, para ser trasplantadas posteriormente. Se transportan en estos semilleros o “tapones” y se caracterizan por su delicadeza, ya que cualquier golpe puede dañarlas por lo que requieren una atención especial. Se usa una bandeja corrugada junto con una almohadilla para ofrecer estabilidad y mantener la humedad adecuada para la planta y que no se estropee la bandeja por filtración de agua. En la figura 2.3, [5], se puede observar el esquema de este método de empaquetamiento.



Figura 2.3: Empaquetado de semilleros.

- Arreglos florales: estos se aseguran dentro de la caja mediante alambres alrededor de los tallos evitando desplazamientos. Si además se transportan junto al florero, éste necesita una protección adicional de acolchado para protegerlo contra golpes. Se recomienda separar las flores del florero mediante una lámina de cartón corrugado. Es importante recordar que está prohibido el transporte de maceteros con agua, por lo que si la flor necesita humedad durante su transporte hay que usar elementos para proporcionársela, como pueden ser almohadillas húmedas. En el caso de flores especialmente delicadas como pueden ser las orquídeas, se requiere dejar espacio suficiente entre sus maceteros durante el transporte. También se recomienda envolverlas con papel para evitar el roce entre unas y otras, lo que dañaría sus hojas.

Muestras clínicas líquidas

Sangre, orina y otros fluidos que contengan o puedan contener sustancias infecciosas deben ser enviadas de acuerdo con las especificaciones dictadas por el gobierno, de la IATA [7] y de la ICAO [8]. Las pautas indicadas a continuación son usadas para el traslado de sustancias consideradas no infecciosas. Para empaquetar muestras clínicas líquidas se utilizan cuatro elementos, dentro de los cuales existen varias opciones aceptables como las de la figura 2.4, [5].

1. Envase hermético primario: se usan recipientes herméticos con cierres a presión, de empuje o rosca, sellándolos adicionalmente con cinta adhesiva. Estos pueden ser de plástico o vidrio, según la sustancia portada. Si se incluyen varios envases primarios en un mismo empaque secundario, estos tienen que estar debidamente envueltos de forma individual o separados de manera que no se produzcan roces entre ellos.

2. Material absorbente: debe colocarse material absorbente entre el envase primario y el secundario asegurando la absorción de las sustancias transportadas en caso de derrame. Hay que incorporar la cantidad necesaria para absorber la totalidad de los productos, colocándose en el peor de los casos. Existen varios materiales aceptables tales como bolas de algodón, toallas de papel, bolitas de celulosa o paquetes superabsorbentes.
3. Recipiente hermético secundario: los más usados son recipientes de plástico, latas con tapa roscada y bolsas de plástico selladas.
4. Empaque exterior resistente: se emplean empaques rígidos de metal, plástico o fibras de madera. No son aceptables los empaques de cartón o madera aglomerada para el transporte de estos productos.

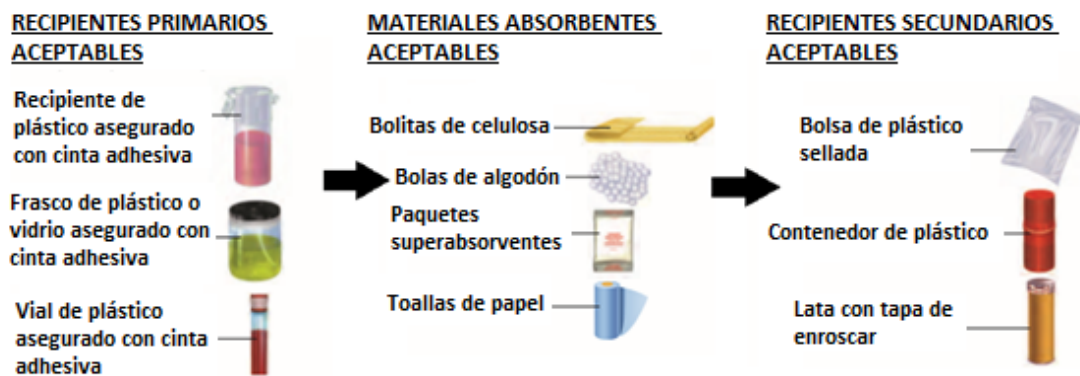


Figura 2.4: Elementos aceptables para empaquetamiento de muestras clínicas.

Baterías cargadas

El transporte de baterías cargadas o de elementos que las contengan es muy peligroso ya que, si se calientan, pueden incendiarse, resultando difícil apagar el fuego. Estas también se consideran peligrosas por poder desprender sustancias corrosivas. El transporte de estos productos está regulado por las reglamentaciones de la IATA, [7] y la ICAO, [8] .

La forma de empaquetar baterías se puede resumir con las pautas que se exponen a continuación y con el esquema mostrado en la figura 2.5, [5].

1. En el caso de transportar más de una en el mismo empaque, estas deben ser separadas mediante divisiones no conductoras.
2. Se sujetan de forma segura y con rejillas de ventilación hacia arriba para evitar sobrecalentamientos.

3. Se empaquetan en contenedores que suelen ser de metal con un revestimiento a prueba de pérdida de ácido.
4. Se introducen finalmente en contenedores externos resistentes.

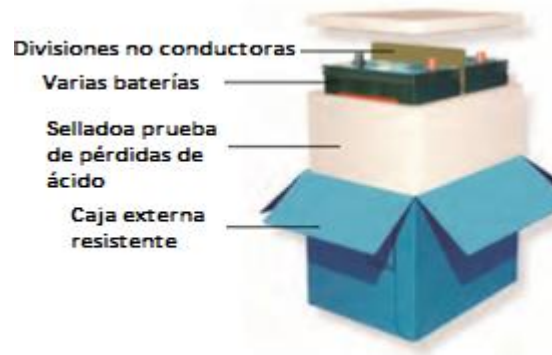


Figura 2.5: Empaque de una batería con electrolito.

2.3. Protección mediante relleno

Vivimos en una sociedad en la que las empresas se mantienen continuamente en lucha por superar y ser mejores que las demás. Esto se consigue destacando sobre las demás, con la búsqueda de ventajas competitivas que las diferencien. Existen varias formas de diferenciación como la calidad o la innovación a la hora de prestar servicios a los clientes, pero dada la situación socioeconómica actual, cada vez son más las empresas que buscan su diferenciación en los costes.

Dentro de la compleja estructura interna que puede llegar a tener una empresa existen multitud de formas con las que reducir costes. Una de las más explotadas es la reducción de costes en el transporte. Se busca trasladar la mayor cantidad de productos posibles en un mismo viaje, disminuyendo así el coste debido al transporte aplicado a cada producto. Esto se puede conseguir empleando envases o productos con geometrías específicas que faciliten su apilado ocupando el menor espacio posible.

La dificultad de esto reside en el transporte de productos frágiles o intolerantes a impactos. Estos necesitan de dispositivos de protección que en ocasiones tienen mayor volumen que el propio producto. La única manera de reducir los costes de transporte en estos casos es buscar la optimización de estos sistemas, consiguiendo el mismo nivel de protección, pero usando el menor espacio posible.

El método de protección más utilizado por su sencillez y facilidad de obtención es el de relleno. Los productos con o sin empaque secundario son embalados, uno a uno o agrupando varios, dependiendo del tamaño, en un empaque terciario junto a materiales de rellenos encargados de absorber los posibles choques que se puedan producir, tanto entre los mismos productos como entre estos y un elemento exterior. Las formas de colocar estos elementos, así como los materiales que los componen, son variadas. Esto depende del grado de protección que se quiera alcanzar para el producto y del presupuesto

destinado a este fin. Se buscan materiales y geometrías versátiles que sean apropiadas para más de un producto, por lo que se usa más material del necesario para asegurar su protección. Esto lleva al aumento de costes, tanto en materia prima para fabricar estos elementos, como en transporte al obtener un volumen mayor al necesario.

A continuación, se enumeran los materiales de relleno más comunes en la actualidad, [9].

1. Plástico burbuja.

El plástico de burbuja proporciona alta protección ante impactos, debido a su flexibilidad y capacidad de amortiguación. Esto lo hace adecuado para el transporte de productos frágiles y delicados. Este material está diseñado para para aguantar la presión de aire de su interior. Es posible que al recibir un choque alguna de sus burbujas se dañe debido a la excesiva absorción de energía, necesaria para amortiguar el impacto. En este caso, se desecha este plástico burbuja y se sustituye por uno nuevo, pero en caso de no sufrir deterioros resulta reutilizable.

Se puede combinar con distintos materiales. Con papel Kraft para protección de muebles, con aluminio para proteger productos sensibles a altas y bajas temperaturas y con espuma para obtener además protección contra arañazos.

2. Plástico de burbuja isotérmico

Este es similar al plástico de burbuja convencional. Además de las propiedades que lo hacen adecuado para la amortiguación de golpes durante el traslado de las botellas, mantiene la temperatura del producto embotellado gracias al uso de material isotérmico que a la vez actúa como barrera contra humedad y vapor. Esta cualidad lo hace adecuado para el transporte de productos como vinos, de los cuales muchos pueden verse perjudicados por los cambios de temperaturas, [10].

3. Película (film) de espuma

El film de espuma está compuesto por polietileno de estructura micro-celular. Este es adecuado para la protección de productos con superficies delicadas. Está diseñado para absorber golpes, pero tiene menor capacidad de amortiguación que el papel burbuja. Es fácil de manejar y se encuentra con variedad de espesores lo que permite una envoltura rápida de los productos a proteger. Se considera reutilizable pero debido a su bajo coste se desecha una vez cumplida su función. Suele usarse junto al cartón cuando se quiere empaquetar el producto como se aprecia en la figura 2.6, [9], ofreciendo protección contra golpes pequeños.



Figura 2.6: Film de espuma, [9].

4. Protección de espuma personalizada

Protección mediante espuma para productos que necesitan que esta sea rigurosa. Para ello se realizan piezas de espuma con la geometría adecuada al elemento a proteger, por lo que una vez que cumple su función solo puede ser utilizado con artículos idénticos. Existen varios materiales adecuados para la elaboración de esta espuma.

- Poliestireno (PE): proporciona amortiguación frente a vibraciones e impactos. Material de gran elasticidad adecuado para el transporte de piezas de valor que son relativamente frágiles, adaptándose a las partes sobresalientes de estas como se ve en el ejemplo de la figura 2.7 (a), [9].
- Poliuretano (PU): este es un poco menos rígido y presenta mayor elasticidad que el polietileno. Además, se maneja con facilidad resultando perfecto para la protección de productos frágiles y de pequeñas dimensiones, consiguiendo envolverlos en un molde idéntico a estos como se aprecia en la figura 2.7 (b). Además, entre sus propiedades destacan su alta resistencia a productos químicos y a la humedad.
- Espumas antiestáticas: pueden ser de polietileno o poliuretano, pero son tratadas para proporcionarles propiedad aislante por lo que se suele usar en el transporte de elementos que además de frágiles, son susceptibles a cargas de electricidad estática. Se caracterizan por poseer un color rosado como el de la figura 2.7 (c).

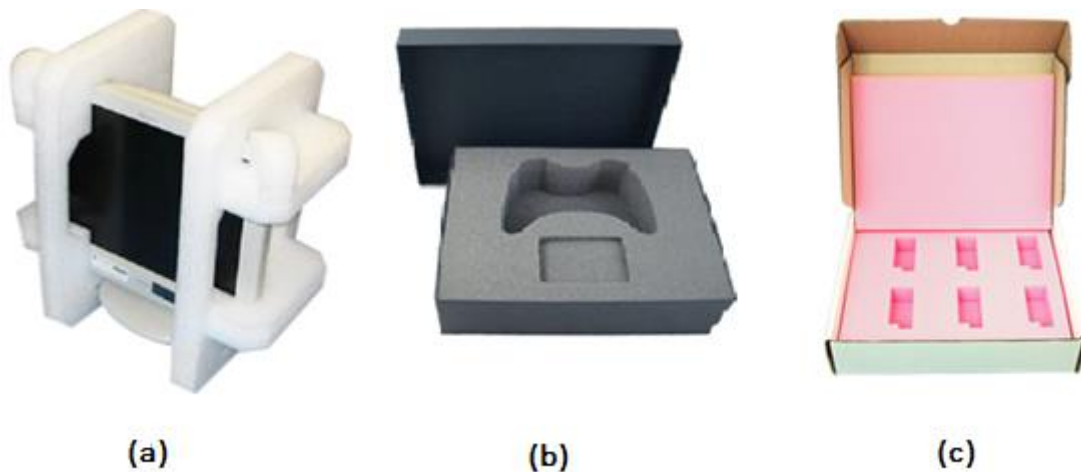


Figura 2.7: Protecciones personalizadas con espuma de: Poliestireno (a), poliuretano (b) y espuma antiestática (c), [9].

5. Perfiles de espuma

Usados para la protección de esquinas y bordes. De uso fácil y rápido, lo que los hace económicos y adecuados para embalajes en los que se necesita proteger algunas partes del producto, cuando estos no son demasiado frágiles. Existen multitud de formas y tamaños que se amoldan adecuadamente a cualquier producto.

6. Bolas de relleno

Se trata de pequeños trozos de poliestireno con los que se rellenan los espacios vacíos que quedan entre los productos dentro de su empaque terciario. Estos se pueden usar con artículos con cualquier geometría, ya que debido a su tamaño de amoldan esta, relleno tanto espacios exteriores como interiores si los hubiese. Destacable por su capacidad de amortiguación y absorción de presión. Resulta un sistema versátil y económico debido a su larga vida útil. También existe una versión biodegradable de éste, utilizada en la industria farmacéutica y química.

Su desventaja está en el espacio necesario para su uso ya que en ocasiones ocupa lo mismo o incluso más que las piezas a las que protege.

7. Cartón y papel

Para envolver y rellenar productos proporcionándoles estabilidad y fijación durante su traslado. Se puede usar en rollos como relleno para bloquear posibles deslizamientos en el interior del empaque y evitar así rozaduras. También se puede usar en forma de placas o planchas como estabilizadores y para facilitar el correcto apilamiento de los elementos

a transportar. Existen distintos tipos según su composición haciéndolos adecuados para distintos casos, como se explica a continuación.

- **Papel Kraft:** resistente a la perforación y a desgarres. Adecuado para envolver piezas proporcionándoles además de protección contra roces, una mejor imagen y presentación. Su capacidad de amortiguación es prácticamente nula haciendo necesaria una cantidad abundante de éste en caso de protección de productos frágiles o susceptibles a golpes. Por lo tanto, no es aconsejable su uso en estos casos.
- **Cartón ondulado:** este suele ser utilizado en forma de planchas proporcionando estabilidad a las cargas o separado unos productos de otros. Presenta mayor capacidad de amortiguación que el papel Kraft, pero se ajusta con mayor dificultad a muchas geometrías. También se puede encontrar en forma de rollos con mayor flexibilidad que las placas, que lo hace más adecuado para envolver productos o proteger bordes y esquinas.
- **Cartón de nido de abeja:** adopta este nombre debido a su forma, similar a la forma de una colmena de abejas, como se puede apreciar en la figura 2.8, [9]. Este tipo de geometría le proporciona capacidad de amortiguación a la vez que rigidez dependiendo de la orientación en la que se le apliquen las cargas. Además, se trata de un material de fácil manipulación y corte, pudiendo amoldarse a elementos con distintas geometrías. Esto permite su uso en el transporte y almacenamiento de productos frágiles consiguiendo protección a la vez que estabilidad. Aun así, si los elementos a transportar son excesivamente frágiles, es necesario el uso de mucho material aumentando tanto los costes de materia prima como los de transporte o almacenamiento.

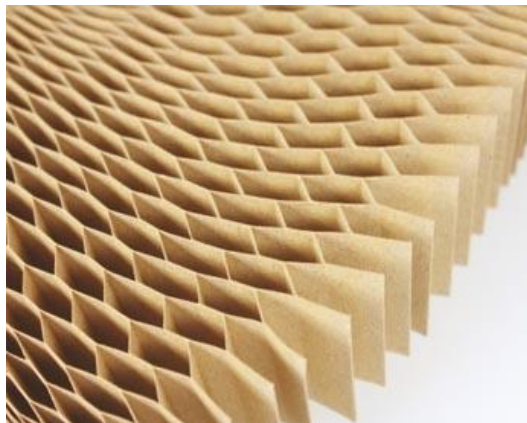


Figura 2.8: Cartón de nido de abeja, [9].

8. Espuma expandible.

Se trata de una de las soluciones más precisas ya que se ajusta a cualquier geometría sin dejar ningún espacio libre entre su superficie y la de la pieza a la que envuelve, como

se observa en los ejemplos en la figura 2.9, [9]. Originalmente su estado es líquido, hasta el momento de su uso, pudiendo expandir hasta 280 veces su volumen. Esto facilita su transporte hasta su uso. Una vez que está expandida, cuenta con buenas propiedades mecánicas que absorben la energía debida a choques con facilidad. Se trata de un material caro por lo que es específico para transportar productos valiosos y que realmente necesiten de este para su transporte.



Figura 2.9: Espuma expandible, [9].

9. Bolsas de aire

Consiste en bolsas, almohadillas o colchones de polietileno de pequeño espesor rellenos de aire. De todos los sistemas mencionados hasta ahora, este es el que mayor protección frente a golpes ofrece ocupando poco espacio debido a su gran capacidad de amortiguación. Cada día son más las empresas que sustituyen sus sistemas de empaquetamiento tradicionales por este, debido a que se trata de una solución rápida, económica y limpia. Además, estas bolsas suelen usarse mediante rollos en los que vienen desinfladas y pegadas unas a otras, manteniendo la cavidad de cada una separada. Se emplean junto a máquinas mediante las cuales se le introduce el aire con la presión y en la cantidad adecuadas, permitiendo la separación de las bolsas una vez se tengan las necesarias. Se trata de maquinaria más compleja y precisa que la usada en otros sistemas por lo tanto requiere una inversión mayor que en otros sistemas, pero fácil de amortizar.

El problema que presenta este sistema es que debido a su estandarización es necesario el uso de mayor cantidad de bolsas de las necesarias cuando se transportan productos. Al no ajustarse con exactitud a cualquier geometría se incluyen en el relleno más de las necesarias por seguridad, aumentando así los costes de transporte y de energía eléctrica para las máquinas de relleno (los de materia prima pueden considerarse despreciables ya que el coste de las bolsas es bajo).

2.4. Empaquetamiento de botellas de vidrio

Uno de los sectores en los que mayor importancia cobra la protección de sus productos mediante el empaquetado es de las botellas de vidrio. Estas son usadas cada vez más, debido a la multitud de ventajas y buenas propiedades que presenta el vidrio en comparación con otros materiales.

La fragilidad es una de las pocas desventajas que presentan las botellas de vidrio, por lo que resulta rentable para las empresas investigar en sistemas de empaquetamiento para así contrarrestarla, haciendo de estas un envase idóneo para sus productos.

A parte del coste que tienen las botellas, los productos que se suelen envasar en ellas tienen también gran valor, por lo que resulta interesante disminuir las pérdidas debidas a roturas a la hora de transportarlas.

Además de la posibilidad de empaquetar botellas utilizando los sistemas de relleno, existen varios tipos de empaquetamiento específicos para ellas. Estos dependen del grado de protección que se quiera proporcionar y de la cantidad de material y espacio que se está dispuesto a emplear para ello.

2.4.1. Sistemas de empaquetamiento generales de botellas

Existen bastantes sistemas de empaquetamiento de botellas en los que el principal objetivo es protegerla mediante uno o varios elementos, dependiendo del grado de protección deseado y de las propiedades de los materiales usados en dicho sistema. A continuación, se exponen varios sistemas capaces de proteger botellas si estas no reciben impactos de gran magnitud. Son útiles como complementos junto a otros sistemas.

Cajas de cartón para botellas (TotalSafePack)

Tienen como principal objetivo ofrecer un embalaje de confianza y seguro para el manipulado y traslado de botellas de vidrio, en especial de vino.

Están compuestas por cartón ondulado con un diseño dispuesto a minimizar los riesgos de roturas durante el transporte. Con este sistema se ha conseguido reducir un 95% el índice de rotura de botellas con respecto a otros sistemas convencionales, consiguiendo premios como el Premio Liderpack 2013 y 2016 al Mejor Embalaje de cartón para envío de botellas y el premio World Star Award, Categoría Embalajes y Bebidas 2014.

Se trata de un sistema que resulta económico y de fácil montaje y utilización, además de poseer la opción de embalar varias botellas a la vez gracias a que es un sistema modular, como se aprecia en la figura 2.10, [11]. Ofrece protección ante golpes gracias a su rigidez, pero teniendo en que es incapaz de absorber impactos debidos a caídas de gran magnitud. Una misma caja puede emplearse para distintas geometrías y tamaños, sin salirse de los estándares en cuanto a forma por lo que unos de los fallos que se pueden encontrar en este sistema es la poca optimización de espacio y material que se consigue.



Figura 2.10: Sistema TotalSafePack, [11].

Mediante mallas protectoras

Este método es uno de los más simples que consiste en recubrir la botella mediante un material con características y formas determinadas. Este no es suficiente para evitar roturas cuando la botella sufra un golpe. Debido a su reducido uso de espacio, su empleo es factible junto a otros sistemas de empaquetado, aumentando así la seguridad del producto.

Destacan dos tipos de malla específicos para botellas ajustándose adecuadamente a su geometría, malla tubular de espuma en rollo, Figura 2.11 (a) y protección tubular de cartón, Figura 2.11 (b), [12],

- Malla tubular de espuma en rollo: fabricada en poliestireno extruido. Poseen alta elasticidad, pudiendo adaptarse a distintos diámetros.
- Protección tubular de cartón: fabricada en cartón biondulado, aunque con menor elasticidad que la anterior, también se adapta a distintos diámetros y formas.



Figura 2.11: Malla tubular de espuma en rollo (a) y protección tubular de cartón (b), [12].

Contenedor de poliestireno

Contenedores fabricados en poliestireno, con las cavidades adecuadas para introducir botellas. Estos hacen las funciones de empaque secundario, normalmente junto a una caja de cartón como empaque terciario y como complemento de protección como se muestra en la figura 2.12, [13]. Este sistema proporciona bastante seguridad a las botellas, absorbiendo con gran efectividad los posibles golpes recibidos. Su mayor desventaja es el uso de mucho espacio y material para la obtención de dicha protección lo cual lleva a las empresas a cuestionar su uso ya que esto aumenta los costes de transporte.



Figura 2.12: Contenedor de poliestireno, [13].

Molde de corcho

Sistema para estabilizar y proteger botellas empaquetadas. Se realiza mediante el apilamiento de placas de corcho con la forma de la botella que se quiere empaquetar como las de la figura 2.13, [14]. Este permite dibujar el negativo de diferentes secciones de la botella obteniendo así estas placas que se ajustan perfectamente a su geometría. La botella queda inmóvil y protegida de caídas, golpes y vibraciones.

Se trata de un sistema modular flexible que se adapta a todo tipo de formas sin restricciones. Las mismas placas no se pueden usar con botellas de distinta geometría, por lo que solo se puede considerar reutilizable en el caso de un transporte repetido de botellas idénticas



Figura 2.13: Placas de corcho, [14].

2.4.2. Sistemas de empaquetamiento tolerantes a impactos

Para transportar productos frágiles, la mayor preocupación es su pérdida por rotura al existir la posibilidad de que estos reciban un golpe fuerte debido a un impacto. En muchas ocasiones, debido a querer disminuir costes de desplazamiento, se transportan productos empaquetados sin relleno o con el relleno insuficiente para tolerar un impacto sin interferir en sus propiedades.

Una opción de empaquetado para productos frágiles, con el que se consigue ahorrar espacio de relleno son los sistemas de empaquetamiento tolerantes a impactos. Se trata de bolsas rellenas de aire, dispuestas con distintas configuraciones alrededor del producto a proteger. Estas actúan como las bolsas de aire usadas en los métodos de empaquetado mediante relleno, pero se ajustan mejor al producto, ahorrando así tanto espacio como material innecesario.

Hasta ahora este tipo de empaquetado se suele usar para transportar elementos frágiles en equipajes. Estos se usan en la mayoría de los casos para trasladar botellas de vidrio, existiendo varios tipos de sistemas, dependiendo de las necesidades. A continuación, se muestran algunos ejemplos de sistemas de empaquetamiento tolerantes a impactos para transportar botellas de vidrio. Sin embargo, estos no aseguran protección frente a un impacto directo, aunque son adecuados para protegerlas dentro del equipaje o algún empaque terciario.

Vinibag (Bolsa inflable)

Consisten en bolsas de plástico con cámaras de aire inflables, adecuada para proteger y aislar de golpes y contra fugas, objetos frágiles como botellas de vino u otros líquidos. Estas se suelen usar en viajes, ya que los productos pueden sufrir impactos en la maleta sobre todo en viajes de avión. Se trata de un sistema reutilizable, por lo que no contribuye demasiado al impacto medioambiental producido por los desechos plásticos.

Tales bolsas son fáciles de utilizar y se pueden enrollar mientras que no se usan, ahorrando espacio. Además, se puede adaptar a botellas con distinta longitud, enrollando la parte sobrante sin que ésta se hinche, como se observa en la figura 2.14, [15]. Esto provoca la imposibilidad de asegurar la protección de todo tipo de botellas, ya que los distintos tamaños y pesos provocan deceleraciones diferentes en el momento del golpe llevando a tensiones que en ocasiones pueden provocar su rotura. Peor aún sería la situación en la que la botella cae, contactando por la parte enrollada, la cual proporciona menor protección, lo que aumenta bruscamente las deceleraciones y tensiones.

Por todo esto, son aptas como protección para botellas en maletas, donde el golpe nunca es directo, pero no para transportar mercancía ya que necesitaría de empaques complementarios.



Figura 2.14: Vinibag, planta y perfil, [15].

Wineskin (Bota de vino)

Es una bolsa hermética fabricada en PVC transparente. Contiene bolitas de aire en su interior lo que proporciona amortiguación neumática en caso de impacto. Este elemento es resistente, flexible y tiene costuras selladas alrededor, lo que evita cualquier derrame de líquido. Su cierre es de un único uso y se realiza mediante dos cintas adhesivas. Este tipo de cierre disminuye la protección en esa zona. Se ajusta a botellas con un tamaño estándar de unos 750ml de volumen como la de la figura 2.15, [16]. Aun así, no se trata de una protección personalizada por lo que no se puede considerar un sistema bien optimizado ni asegurar al cien por cien la protección de todas las botellas. Al ser de un solo uso se tiene que desechar una vez cumplida su función, provocando un aumento en los costes, además de colaborar con el problema medioambiental al que se enfrenta la sociedad con el sector de los plásticos.

Por todas estas razones, este sistema no se puede usar en la industria para proteger productos en su transporte. En cambio, se trata de una buena opción para el traslado de botellas de vidrio en viajes ocasionales.



Figura 2.15: Wineskin, [16].

Airbags (Bolsas de aire)

Sistema en el que la protección contra impactos se produce con la colocación de pequeñas bolsas de polietileno rellenas de aire. Estas absorben el impacto mediante amortiguación neumática. Existen bolsas de distintos tamaños para reunir un amplio abanico de posibilidades, pero estas no se ajustan exactamente a la geometría de la botella dejando huecos entre ella y las bolsas. Las más usadas se colocan en el sentido longitudinal de la botella como las de la figura 2.16, [17]. También existen conjuntos de bolsas unidas entre sí para transportar varias botellas a la vez.



Figura 2.16: Airbags (Bolsas de aire), [17].

3. Metodología

Para llevar a cabo el estudio sobre la disposición de airbags para el empaquetamiento de una botella de vidrio se realizarán ensayos virtuales mediante un código de modelado, en los que se provocará el impacto entre una botella protegida por bolsas de aire y un elemento que hará las funciones de suelo. Para ello se empleará un software basado en el método de los elementos finitos, llamado Abaqus®. Se compararán distintos parámetros y comportamientos, obteniendo conclusiones de cuales tienen mayor o menor influencia en la protección de la botella y de cómo mejora o empeora esta protección con la variación de distintas características de los airbags como geometría, presión, y espesor, entre otras.

3.1. Método de los Elementos Finitos (MEF)

El método de los elementos finitos es una herramienta de cálculo, basada en formulaciones débiles de ecuaciones de equilibrio, que ha cobrado mucha importancia en los últimos años, ya que permite solucionar problemas que no se podían resolver con los métodos de cálculo tradicionales o resultaban muy complejos.

Existen multitud de programas informáticos basados en este método que proporcionan resultados aproximados del comportamiento de toda clase de diseños ingenieriles. De esta forma se evita el uso de prototipos de ensayo innecesarios, reduciendo costes. No obstante, se trata de un método de cálculo aproximado por lo que en algunos casos no puede sustituir al uso de los prototipos de ensayo, pero sí mejorarlos, ya que estos consiguen aproximarse más a la solución final, después de haber sido estudiados mediante los códigos de modelado. Por otro lado, también es recomendable el uso de coeficientes de seguridad en los resultados obtenidos y compensar así las pequeñas imprecisiones de este cálculo.

Este método consiste en dividir un cuerpo continuo en un numero finito de elementos, en los cuales es más fácil escoger una expresión analítica para la función aproximante de sus desplazamientos y así estudiar el conjunto con mayor facilidad. Esta división se denomina discretización. Estos elementos cubren todo el modelo continuo y están unidos unos a otros mediante puntos llamados nodos formando una malla, como se observa en el ejemplo de la figura 3.1, [18].

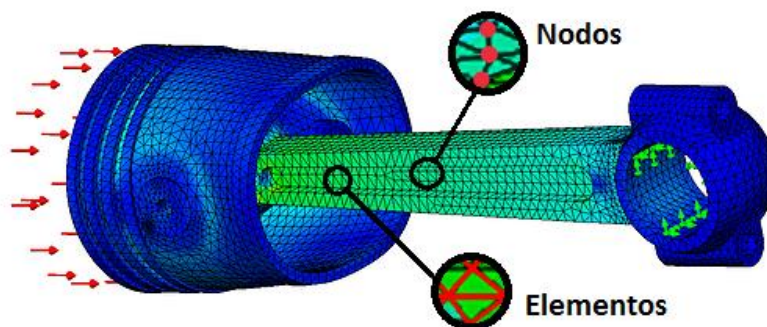


Figura 3.1: Ejemplo de mallado.

La malla cobra mucha importancia a la hora de obtener resultados correctos. Hay que tener en cuenta en que ocasiones se necesita un mallado fino, es decir formado por un gran número de elementos, consiguiendo resultados con mayor precisión. Algunos casos en los que la malla debe ser más fina son los siguientes:

- Cuando se tienen geometrías irregulares y de espesor variable o cuando se producen cambios en las solicitaciones externas. Para cada elemento se adoptan propiedades y cargas externas constantes. Si en el mismo cuerpo estas propiedades son variables, se asignan valores promedios, por lo que cuanto menor sea el elemento, más cercano será el valor promedio al real.
- En zonas donde se esperan elevados gradientes o concentraciones de tensiones (agujeros, fisuras, etc.).
- En zonas de aplicación de cargas o en las que se produzcan contactos entre sólidos.
- En los lugares donde interese la obtención de datos precisos.

En los nodos de los elementos es donde se obtienen los resultados. El comportamiento de los distintos elementos será evaluado mediante funciones de forma locales que relacionan cada elemento con sus nodos, como define la ecuación 3.1, donde \vec{u} es el vector de desplazamientos del elemento “e”, N es una matriz formada por las funciones de forma, las cuales dependen de los elementos usados y d^e es el vector de desplazamientos nodales del elemento “e”.

$$\vec{u} = N \times d^e \quad (3.1)$$

Estas funciones de forma están expresadas en función de coordenadas naturales, entre el rango de valores $[-1, 1]$, consiguiendo sistematizar la implementación del Método de los Elementos Finitos y facilitando la integración de la energía, explicada posteriormente. Este cambio de coordenadas globales (x, y, z) a coordenadas naturales (ξ, η, ζ) se denomina “mapeo”. La expresión de las coordenadas nodales en coordenadas naturales se obtiene mediante la ecuación 3.2 en la que x^e representa las coordenadas nodales del elemento “e”, en coordenadas globales y M es una matriz compuesta por las funciones de mapeo. En los casos de elementos 3D se tienen en cuenta las tres coordenadas como el ejemplo de la figura 3.2, pero conviene aclarar que no todos los elementos dependen de las tres dimensiones del espacio por lo que las funciones de forma no son iguales en todos los casos. Cuando las funciones de mapeo coinciden con las funciones de forma se habla de Formulación Isoperimétrica.

$$x(\xi, \eta, \zeta) = M(\xi, \eta, \zeta) \cdot x^e \quad (3.2)$$

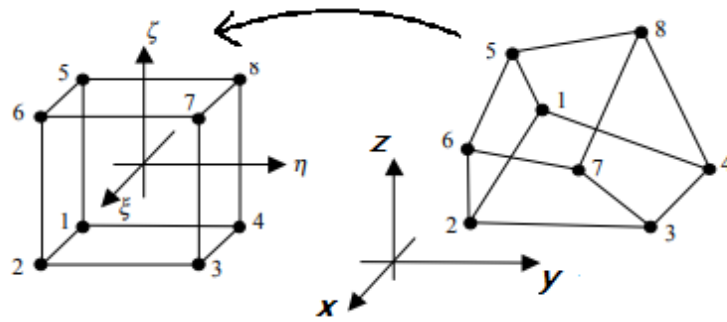


Figura 3.2: Mapeo en elementos 3D.

Conocidos los desplazamientos, es posible obtener las deformaciones producidas mediante la ecuación 3.3, donde ε es campo de deformaciones del elemento “e”, d^e su vector de desplazamientos nodales y B es la matriz de interpolación de deformación del elemento que también depende del tipo de elemento empleado.

$$\varepsilon = B \times d^e \quad (3.3)$$

De forma similar, se pueden obtener las tensiones en el elemento ya que éstas dependen de la deformación y de las propiedades del material empleado. Para ello se emplea la ecuación 3.4. En la cual aparece un nuevo parámetro D que consiste en una matriz de interpolación de tensiones que depende del tipo de elemento escogido y de las propiedades del material del conjunto estudiado.

$$\sigma = D \times B \times d^e \quad (3.4)$$

Por lo tanto, el estudio del comportamiento del conjunto comienza con la obtención de los desplazamientos nodales. Para la obtención de estos desplazamientos, el método de los elementos finitos se basa en el “Principio de la energía potencial mínima”, [19]. En un campo elástico, del conjunto de campos de desplazamiento admisibles, aquellos que consiguen un valor extremo de la energía potencial total, son los correspondientes al equilibrio. Si este extremo es un mínimo, el equilibrio es estable. Dicha energía potencial total está compuesta por un conjunto de energías, formando la ecuación 3.5.

$$\Pi = U + V = \underbrace{\frac{1}{2} \int_V \sigma^T \cdot \varepsilon \cdot dV}_{\text{Potencial de fuerzas internas}} - \underbrace{\sum_i \vec{P}_i \cdot \vec{u}_i}_{\text{Potencial de fuerzas puntuales}} - \underbrace{\int_S \vec{q} \cdot \vec{u} \cdot dS}_{\text{Potencial de fuerzas de superficie}} - \underbrace{\int_V \vec{f} \cdot \vec{u} \cdot dV}_{\text{Potencial de fuerzas de volumen}} \quad (3.5)$$

Para obtener la solución del sistema completo, se realiza el ensamblaje de estos elementos. A cada elemento le corresponde una matriz de rigidez local, k^e , que proviene del desarrollo del potencial de fuerzas internas y define sus propiedades. Mediante el ensamblaje se consigue una matriz de rigidez global, K , que relaciona todos los elementos, definiendo las propiedades de todo el conjunto.

Desarrollando la ecuación de la energía potencial total (3.5), derivándola respecto a los desplazamientos e igualando a cero para hacerla mínima, se obtiene, finalmente, la ecuación 3.6, con la que se calculan los desplazamientos nodales, d , en régimen lineal, en el que la matriz de rigidez se mantiene constante con el paso del tiempo.

$$[K]\{d\} = \{p\} \quad (3.6)$$

3.2. Régimen no lineal

Existen dos tipos comunes de no linealidad, debida a la geometría y debida al material. La no linealidad geométrica surge de consideraciones como las relaciones entre deformación y desplazamiento y la no linealidad material, del comportamiento no lineal de la composición de este.

En problemas no lineales, la matriz de rigidez depende de los desplazamientos, por lo que la ecuación 3.6 se convierte en una ecuación no lineal (3.7). Para la resolución de estas ecuaciones hay que considerar el hecho de que no se puede emplear el principio de superposición y la historia de cargas interviene en los resultados.

$$[K(d)]\{d\} = \{p\} \quad (3.7)$$

A su vez, los desplazamientos dependen del tiempo, por lo que se obtiene una ecuación diferencial dependiente del tiempo. Para encontrar una solución aproximada de este tipo de ecuaciones diferenciales, se pueden emplear dos métodos, el método explícito y el implícito. Los métodos implícitos calculan el estado del sistema en un momento posterior ($t + 1$), teniendo en cuenta este estado y el estado en el momento actual (t), mientras que los métodos explícitos solo tienen en cuenta el estado actual.

En un problema general, si $Y(t)$ es el estado actual del sistema e $Y(t + \Delta t)$ se trata del estado posterior, donde Δt es un pequeño intervalo de tiempo. El problema se resuelve por el método implícito, aplicando la ecuación 3.8 y por el método explícito con la ecuación 3.9.

$$G(Y(t), Y(t + \Delta t)) = 0 \quad (3.8)$$

$$Y(t + \Delta t) = F(Y(t)) \quad (3.9)$$

El problema tratado en el presente estudio es no lineal debido a las geometrías que presenta. El software empleado para su resolución se llama Abaqus®. Se utilizará el método de resolución explícito ya que, aunque menos preciso, necesita menos tiempo de cálculo con lo que se disminuyen los costes computacionales, asumiendo los pequeños errores de aproximación en los resultados obtenidos.

3.3. Abaqus®

Abaqus® es un software de diseño basado en el método de cálculo de los elementos finitos. Permite realizar simulaciones estáticas y dinámicas, lineales y no lineales incluyendo impactos, problemas de fluidos, térmicos, etc.

Para la resolución de problemas no lineales dispone de dos “solvers” (solucionadores), uno basado en el método implícito y otro en el método explícito, mencionados en el subcapítulo anterior.

3.3.1. Solver implícito

Como ya se ha explicado, para calcular la solución en un instante de tiempo t_n , se necesitan los resultados en este instante de tiempo, t , y los obtenidos en el instante anterior, t_{n-1} , y así sucesivamente (figura 3.3). Esto hace que este método sea más preciso, pero complica la resolución de las ecuaciones provocando un aumento del tiempo computacional, comparado con el método explícito en el que solo se tiene en cuenta el instante de tiempo anterior, t_{n-1} .

La ventaja de este método es que se trata de un método incondicionalmente estable para cualquier incremento de tiempo, lo que quiere decir que el error cometido siempre está acotado, pudiendo emplear incrementos de tiempo, Δt , mayores.

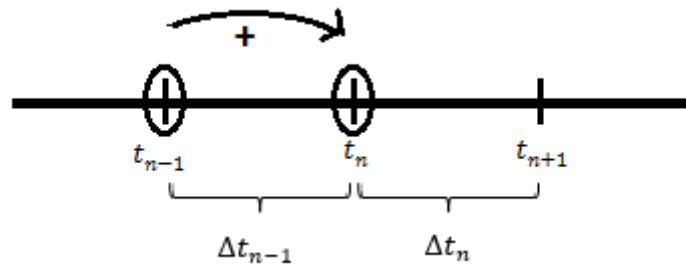


Figura 3.3: Método de cálculo implícito.

3.3.2. Solver explícito

Este método solo necesita los resultados en el instante de tiempo anterior, t_{n-1} , para calcular la solución en un instante de tiempo, t_n , requiriendo menos tiempo computacional. Al contrario que el método implícito, éste es condicionalmente estable, por lo que es necesario el uso de pequeños pasos de tiempo iterativos para lograr la convergencia de la solución. El método explícito es estable cuando el incremento tiempo es menor que el paso de tiempo crítico, que es el tiempo que tarda una onda elástica en recorrer un elemento (ecuación 3.10). Por lo tanto, el menor elemento empleado será el que marque los intervalos de tiempo empleados, independientemente del tamaño del resto de elementos que componen la malla.

$$\Delta t^{max} < \frac{\delta^{min}}{c} \quad (3.10)$$

En la ecuación 3.10, δ^{min} representa el tamaño característico del menor elemento empleado y c a la velocidad de la onda elástica, calculada mediante la ecuación 3.11, donde E , ρ y ν son el módulo de elasticidad, la densidad y el coeficiente de Poisson del material empleado, respectivamente.

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3.11)$$

Los resultados del método explícito son sensibles al tipo de elemento y a la discretización de la malla empleados, siendo más precisos cuanto menores sean, pero a la vez más costosos computacionalmente. Se busca el punto de balance óptimo entre precisión y tiempo, dependiendo de los errores que se puedan permitir, para llegar a una solución de compromiso.

3.4. Teoría de amortiguación

Para tener una idea teórica del funcionamiento del sistema y de cómo se consigue frenar el conjunto mediante la disipación de energía, se describen en este subcapítulo las ecuaciones de la teoría de amortiguación de un cuerpo.

Para simplificar el problema, se supone nula la disipación de energía por fricción (posteriormente se comprueba, en el subcapítulo 1.7, que ésta es lo suficientemente pequeña para ser despreciada). Se puede modelizar el sistema como una masa “ m ”, un resorte con una rigidez “ k ” y un amortiguador con una constante de amortiguación “ c ”, como aparece en la figura 3.4, [20].

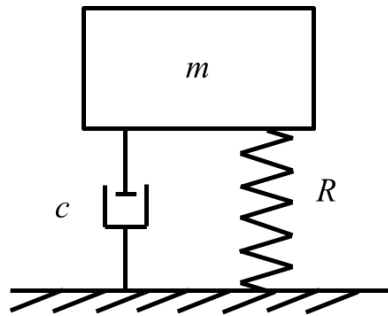


Figura 3.4: Sistema de amortiguación.

Al entrar en contacto con el suelo, sobre la masa “ m ” aparece una fuerza “ J ” y una fuerza “ P ” que en el caso lineal se obtendrían con las ecuaciones 3.12 y 3.13 respectivamente. En estas ecuaciones, x y \dot{x} representan el desplazamiento y la velocidad producidos durante el impacto, respectivamente.

$$J = c\dot{x} \quad (3.12)$$

$$P = kx \quad (3.13)$$

En casos no lineales como el problema al que se enfrenta este estudio, estas fuerzas pueden ser representadas con distintas ecuaciones dependiendo del comportamiento del sistema. En el libro “Dynamics of Package Cushioning”, [20], se presentan varias ecuaciones para definir fuerzas no lineales y modelos de sistemas de amortiguación más complejos y reales.

Si se plantea el equilibrio de fuerzas sobre la masa, se obtiene la ecuación 3.14, donde \ddot{x} es la aceleración del cuerpo.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.14)$$

Si se divide la ecuación 3.14 por la masa, se obtiene la ecuación 3.15.

$$\ddot{x} + 2\beta\omega\dot{x} + \omega^2x = 0, \quad (3.15)$$

donde

$$\beta = \frac{c}{2m\omega}, \quad (3.16)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (3.17)$$

siendo β la fracción de amortiguación crítica, que oscila entre 0 y 1 y ω la frecuencia circular no amortiguada.

Teniendo en cuenta las siguientes condiciones iniciales,

$$x_{t=0} = 0, \quad (3.18)$$

$$\dot{x}_{t=0} = \sqrt{2gh}, \quad (3.19)$$

donde g es la gravedad y h es la altura desde la que cae la masa, se obtiene como solución la ecuación 3.20.

$$\ddot{x} = -\frac{w\sqrt{2gh}}{\sqrt{1-\beta^2}} e^{-\beta wt} \cos(wt \sqrt{1-\beta^2} + \gamma), \quad (3.20)$$

donde

$$\tan\gamma = \frac{2\beta^2-1}{2\beta\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (3.21)$$

Por lo tanto, la aceleración consiste en una onda sinusoidal amortiguada, cuyo valor inicial depende de la cantidad de amortiguación, β . Para valores de β bajos, la aceleración inicial es pequeña y posteriormente aumenta con el tiempo, pero nunca alcanza una aceleración como la que aparecería si no hubiese amortiguación. Para valores altos de β , se produce una aceleración inicial alta que posteriormente disminuye con el tiempo. En la figura 3.5, presentada en el libro “Dynamics of Package Cushioning”, [20], se representan las curvas de aceleración-tiempo para distintos valores de β .

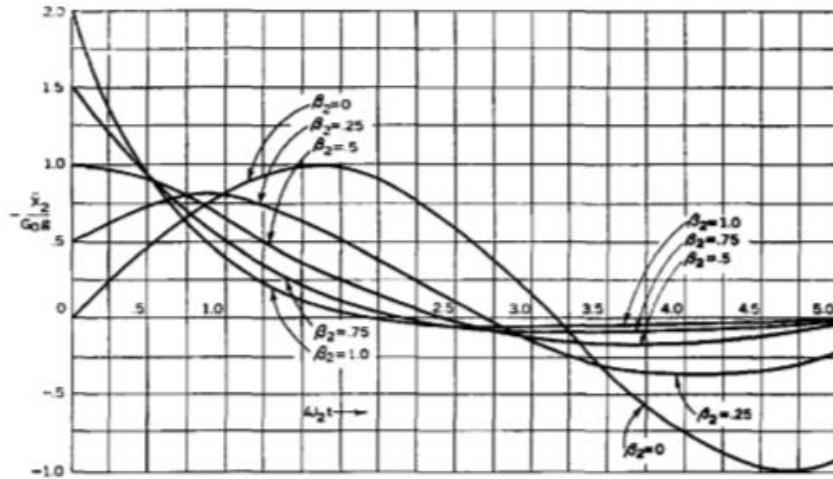


Figura 3.5: Curvas aceleración-tiempo para distintos valores de β , amortiguación no lineal, [20].

Se puede observar que para valores de β mayores que 0.5, la aceleración máxima ocurre en el instante inicial, $t = 0$.

Resulta interesante representar los valores de máxima aceleración respecto a valores de β . Para ello se representan en la figura 3.6, [20], los valores del cociente entre la aceleración máxima con amortiguación (G_m) y la aceleración máxima sin amortiguación (G_0), (ecuación 3.22).

$$G_0 = \sqrt{\frac{2hk}{mg}} \quad (3.22)$$

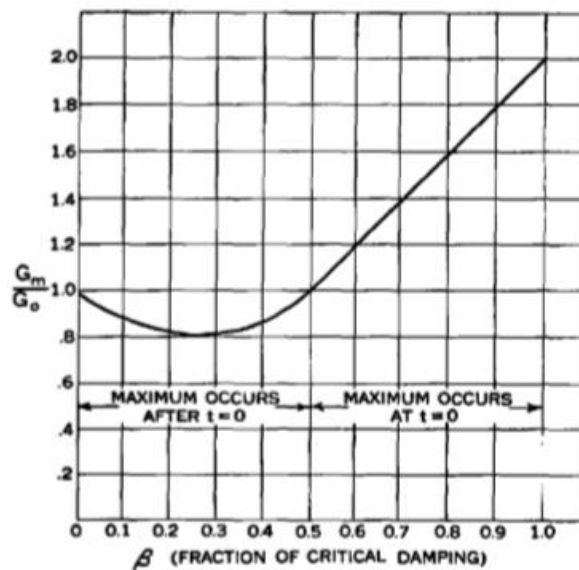


Figura 3.6: Variación de la aceleración máxima respecto a la cantidad de amortiguamiento, [20].

Se puede observar como la aceleración máxima disminuye con el aumento del amortiguamiento hasta llegar a un punto en el que comienza a aumentar si se sigue ampliando esta amortiguación.

En los resultados del estudio se comprobará como el incremento de la presión aumenta la rigidez del conjunto de airbags y por tanto las aceleraciones máximas, mientras que una presión demasiado baja hace contactar la botella con el suelo, por lo que uno de los objetivos será encontrar el valor de presión óptimo.

En el artículo [21], de la revista “Packaging Technology and Science”, se exponen distintos métodos para estudiar problemas de amortiguación no lineal.

3.5. Variable de comparación

Este estudio se basa en la optimización de una serie de airbags que cubren una botella y la protegen en caso de impacto, por lo que el principal objetivo es conseguir la mayor protección posible y determinar de qué parámetros depende ésta.

La rotura de la botella al recibir un golpe se debe a la aparición en ésta de tensiones mayores a la tensión de rotura del vidrio, que es el material en el que está fabricada la botella. El estudio del campo de tensiones que aparecen en un impacto es muy complejo. Se produce un alto gradiente de estas tensiones en la zona de contacto, por lo que se necesita un mallado muy fino en esta zona, como se explica en el subcapítulo 3.1. Esto provoca un aumento en el coste computacional debido al aumento del número de elementos empleados.

Estas tensiones son provocadas por las fuerzas que aparecen sobre el conjunto airbags-botella en el momento en el que se produce el impacto. Estas fuerzas son resultado del producto entre la masa del conjunto y las deceleraciones que aparecen en este al entrar en contacto con un cuerpo que presenta una velocidad nula. La botella empleada en todas las simulaciones realizadas será la misma, con la misma geometría y la misma masa. Si a esto se añade que la masa de los airbags, que son los elementos que pueden cambiar entre simulaciones, se considera despreciable en comparación con la de la botella, se puede suponer la masa del conjunto constante. Por lo tanto, la fuerza que provoca las tensiones que dañan la botella solo dependen de la aceleración. El estudio de las aceleraciones sufridas por un cuerpo es mucho más sencillo que el de las tensiones, así que la variable de comparación entre los distintos modelos realizados en este estudio será la aceleración máxima sufrida por la botella, resultando mejores los modelos en los que esta aceleración máxima es menor.

3.6. Velocidad inicial

Para que las comparaciones entre los distintos modelos tengan coherencia además de usar la misma botella, el conjunto tiene que impactar con la misma velocidad en todos los casos.

En esta simulación suponemos un entorno sin gravedad para simplificarlo, reduciendo así tiempo computacional. De este modo, el cuerpo se mueve a velocidad constante hasta que entra en contacto con el suelo. Es en ese instante, cuando aparecen las aceleraciones que pueden dañar la botella y que interesa estudiar. Una vez que se amortigua el golpe, el conjunto airbags-botella se desplaza en sentido contrario al inicial y de nuevo con velocidad constante y sin aceleración. Este comportamiento difiere del que tendría en un entorno real, en el que existiría gravedad y el cuerpo debería caer de nuevo, pero este segundo impacto es de menor magnitud y no merece la pena su estudio. Solo es necesario estudiar el impacto inicial ya que es el más desfavorable.

Cabe la posibilidad de dañar el airbag en el primer impacto, desprotegiendo la botella en los siguientes. En el postproceso se comprueba que en los modelos considerados como aceptables, si los airbags sufren plastificación durante el impacto, esta es mínima y en zonas muy pequeñas. Los airbags pueden sufrir pequeños daños, pero esto no influye en la protección de la botella contra los impactos posteriores que son de menor magnitud.

Como no interesa estudiar el comportamiento del conjunto durante el tiempo de caída (no hay aceleraciones y el modelo no sufre cambios en este tiempo), se coloca éste a pocos milímetros del suelo, asignándole la velocidad con la que el conjunto llegaría a éste. En este estudio se supone una caída libre desde una altura de 1.25-1.30 m, por lo que, con la ley de conservación de la energía mecánica (ecuación 3.23) se obtiene una velocidad aproximada de 5m/s.

$$\frac{1}{2} \times m \times v^2 = m \times g \times h \quad (3.23)$$

La masa en esta ecuación no influye. Considerando una gravedad de 9.8 m/s^2 y una altura de 1.27m se obtiene la velocidad a la que se produce el impacto (ecuación 3.24).

$$v = \sqrt{2 \times 9.8 \times 1.27} = 4.989 \text{ m/s} \approx 5 \text{ m/s} \quad (3.24)$$

3.7. Energías en modelos de elementos finitos.

Como se ha desarrollado en el subcapítulo 3.1, la resolución de problemas mediante el método de los elementos finitos es aproximada y se basa en principios energéticos. Durante todo el proceso a estudiar, la energía total del modelo debe ser constante para que este proceso sea lo más aproximado a la realidad como sea posible. Si durante el estudio de algún modelo, la energía total cambia de manera considerable, éste no se puede clasificar como aceptable, ya que los métodos de integración no están siendo lo suficientemente aproximados.

En el problema tratado en este estudio, aparecen dos energías principales, la energía potencial y la cinética, que muestran como se produce el impacto, y varias energías de

disipación que disminuyen la energía potencial, consiguiendo que el conjunto alcance, tras el impacto, una altura menor a la altura de caída. De este modo los sucesivos impactos serán cada vez menores hasta conseguir que el conjunto pare. En las simulaciones llevadas a cabo en este estudio solo se considera el primer impacto, por lo que no se ve como la energía potencial disminuye en cada uno de los siguientes, pero se puede apreciar como ésta lo hace en el primero, ocurriendo de forma similar en los siguientes. En la figura 3.7 se muestran las distintas energías en uno de los modelos empleados.

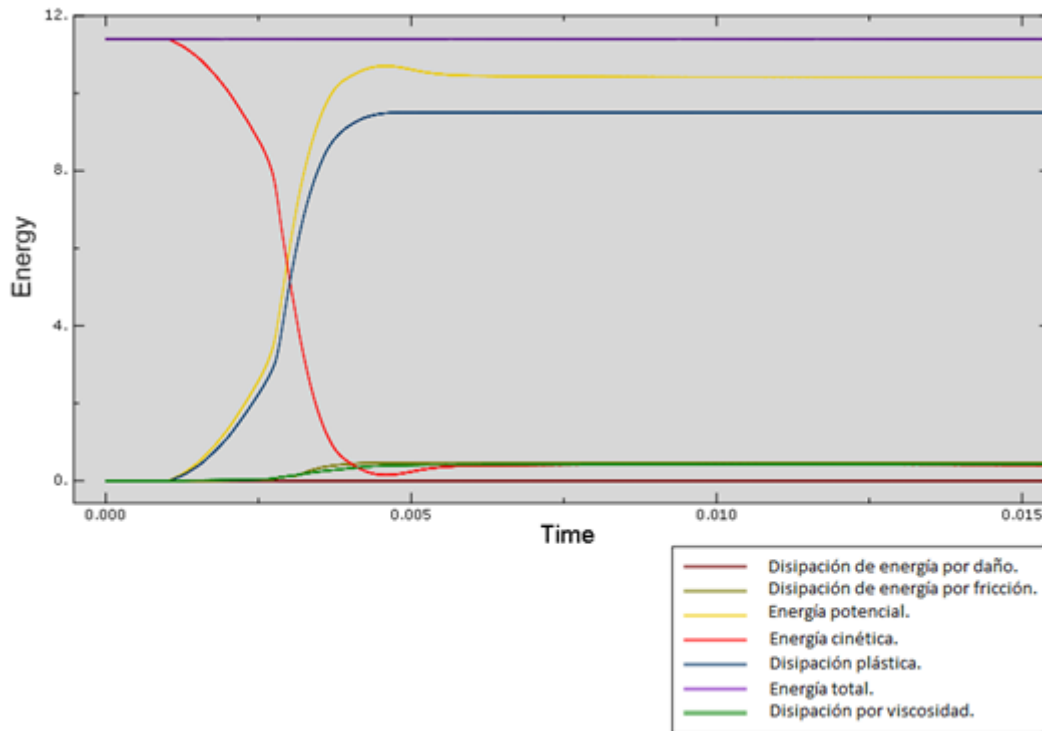


Figura 3.7: Variación de la energía con el tiempo en uno de los modelos.

Se puede observar como en el instante inicial toda la energía es cinética (momento justo antes de que se produzca el impacto) y como durante el impacto esta energía cinética se convierte en potencial. Esta energía potencial es debida a la deformación que se produce sobre el conjunto (la debida a su posición no aparece ya que no hay gravedad en el entorno de la simulación). Como inicialmente la energía potencial es nula, no se puede observar la disminución de esta tras el impacto, pero se puede ver cómo tras este, la energía potencial no es igual a la total, con lo cual ha habido una disipación energética. Por lo tanto, se aprecia una disminución de la energía potencial debido a las distintas formas de disipación de energía. La más importante es la disipación plástica, siendo la que más contribuye en la disminución de la energía potencial. Aparecen además otras dos formas de disipación de energía, la debida a la fricción y la disipación viscosa. Esta última se trata de una energía ficticia que se introduce para poder llevar a cabo la resolución del problema. Se puede considerar despreciable debido a su pequeño valor, por lo que no se

considera que pueda afectar a los resultados. Por último, decir que en este problema la disipación por daño es nula.

3.8. Experimentos

En la realidad, resulta imposible predecir la orientación con la que el conjunto airbags-botella impacta contra el suelo. Por ello, dentro de un mismo modelo, sin hacer cambios en ninguna de sus características, se pueden obtener distintas aceleraciones máximas dependiendo de la orientación con la que impacta. Según la simetría que posea el conjunto de airbags, será necesario evaluar un número mayor o menor de formas de impacto, buscando siempre las más desfavorables. Hay dos parámetros críticos a considerar al escoger las formas de impacto más desfavorables:

- El espacio que queda entre la botella y el suelo (espesor de las cavidades): la botella tendrá más posibilidades de entrar en contacto con el suelo en las zonas en las que la cavidad interior del airbag tiene menor espesor. El contacto entre la botella y el suelo es la situación más desfavorable de todas ya que provoca grandes picos en la aceleración y en las tensiones, que provocan la rotura de la botella.
- La forma en la que entran en contacto los airbags con el suelo: como se estudiará posteriormente, las aceleraciones dependen de la progresión en el contacto de las superficies, apareciendo picos de aceleración cuando el área que entran en contacto con el suelo lo hace de forma repentina.

4. Descripción del modelo de Elementos Finitos

Con el objetivo de optimizar la disposición de airbags para proteger una botella de vidrio en caso de impacto, se han estudiado distintos modelos, siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior. Dada una determinada botella, para cada modelo se varía la geometría y disposición de los distintos airbags que cubren esta botella. En este capítulo se va a describir el diseño de uno de los modelos mediante la herramienta de software presentada (Sección 3.3.), así como la justificación de distintas hipótesis o simplificaciones consideradas en el estudio. Por ese motivo el modelo elegido como ejemplo ha sido el primero de todos los llevados a cabo, ya que algunos de los procesos usados en su diseño y conclusiones obtenidas son extrapolables al resto de modelos.

4.1. Geometría, material y peso

Abaqus® permite diseñar piezas de distintas formas, según sus funciones y los esfuerzos que soportan. La creación de dichas piezas se realiza en el módulo “Part” (Parte). Primeramente, se escoge el tipo de pieza que se quiere realizar, dependiendo de los esfuerzos a los que va a ser sometida y posteriormente se dibuja la geometría deseada, usando las distintas herramientas que el programa ofrece para ello. Este modelo consta de tres tipos de partes, la botella, los airbags y el suelo.

4.1.1. Botella

La botella que se va a proteger tiene una de las geometrías más estandarizadas en el mercado (Figura 4.1), la que usan la mayoría de las empresas de vino para envasar su producto. El material en el que está fabricada es vidrio, con las propiedades reflejadas en la tabla 4.1, [22], [23]. Con este material y estas geometrías el programa proporciona un peso para la botella vacía de 0.825 Kg y un volumen de material de $3.3 \times 10^{-4}\text{m}^3$, dejando un hueco en su interior con un volumen de 0.0089m^3 .

Las propiedades se introducen creando cada material en el módulo “Property” (Propiedad). En este mismo módulo se le asigna un tipo de sección a cada parte, vinculado al material deseado. La sección utilizada en la botella es sólida y homogénea. Abaqus® no permite asignar secciones inapropiadas, es decir, si al crear la parte no se crea esta como un sólido homogéneo, no será posible asignarle un tipo de sección homogénea.

Una vez realizada la “part” para la botella, se crea una “Surface” (Superficie), seleccionando la superficie exterior de esta, para realizar después la unión entre la botella y los airbags.

TABLA 4.1: PROPIEDADES DEL VIDRIO.

Material	Densidad (Kg/m^3)	Modulo Elasticidad (GPa)	Coefficiente de Poisson (-)
Vidrio	2500	70	0.24

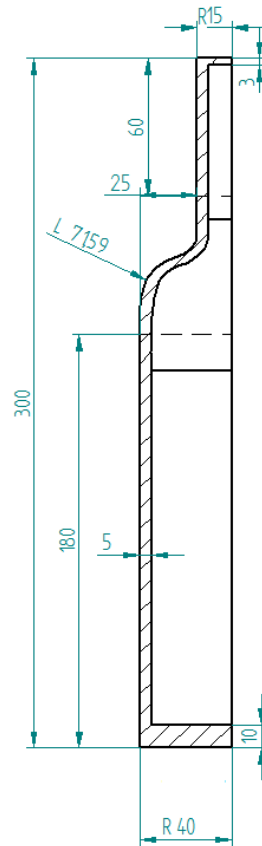


Figura 4.1: Sección botella (mm).

Antes de iniciar las simulaciones de los distintos modelos diseñados, se busca reducir el tiempo computacional mediante simplificaciones que no interfieran demasiado en los resultados obtenidos. Para ello se realizan pruebas con el primer modelo diseñado. Esto conlleva un tiempo computacional adicional pero que reducirá bastante el tiempo de las simulaciones futuras. Una de las simplificaciones que se proponen atañe a la geometría y el material de la botella. Se emplean tres botellas distintas comparando los resultados obtenidos. Una real, que resulta ser la más compleja, con geometría idéntica a la de una botella real y rellena de agua; otra con la misma geometría, pero vacía, aumentando la densidad de su material para obtener el mismo peso total que en la anterior; y, por último, una con la misma geometría exterior pero maciza, a la que se le disminuye su densidad hasta conseguir la misma masa total que las anteriores, que a priori parece ser la variable más influyente en los resultados.

- Botella real: esta es la que mayor tiempo computacional necesita, además de un mallado mucho más preciso y complejo.

Los fluidos deben ser creados como una parte de tipo Euleriano y definir una malla para este y otra para el espacio en el que se prevé que se va a mover el fluido. A la hora de definir sus propiedades se puede usar la ecuación de estado de Mie-Grüneisen con una serie de parámetros específicos. En [24], Varas Doval se introduce este tipo de modelización.

Además, es necesario definir el contacto entre el fluido y la botella como “General Contact” (contacto general). Como este tipo de interacción es la misma que se usa entre el cuerpo y el suelo, y Abaqus® solo permite hacer una por modelo, no es posible simular el agua de este modo.

Como como este estudio no trata sobre el análisis del comportamiento del fluido encerrado, se decide modelar el agua como un material deformable con bajo módulo de elasticidad y alto coeficiente de Poisson, [25]. Como se esperan grandes desplazamientos en este material, se realiza una malla muy fina procurando que sus elementos no se distorsionen excesivamente. Esta modelización es posible gracias a que los desplazamientos del material que simula el fluido no poseen demasiada libertad ya que ocupan casi toda la cavidad de la botella. Si esto no fuese así, no sería posible modelarlo de este modo ya que los elementos se distorsionarían y los resultados obtenidos serían falsos o incluso, podría darse el caso de que el programa no permitiese la simulación, quedando como única posibilidad de modelado, el euleriano.

- Botella vacía: sin hacer cambios en la geometría de la botella, se calcula el volumen de material que la forma. Este se puede obtener directamente del programa en el apartado de información sobre masa y volumen. La botella estudiada presenta un volumen de material ($V_{vacía}$) de $3.3 \times 10^{-4} m^3$ y hay que conseguir que tal volumen de material alcance la cantidad de masa (m) de la botella llena. Con el programa se puede obtener tanto la masa de la botella como la de la pieza que simula el agua, sumando entre ellas un total de 1.6 Kg.

Por tanto, se crea un material ficticio con propiedades iguales a las del vidrio, exceptuando la densidad ($\rho_{vacía}$) que se calcula cómo indica la ecuación 4.1.

$$\rho_{vacía} = \frac{m}{V_{vacía}} = \frac{1.6 \text{ Kg}}{3.3 \times 10^{-4} m^3} = 4848.485 \text{ Kg}/m^3 \quad (4.1)$$

Este modelo resulta mucho más simple que el anterior al no requerir de una gran cantidad de elementos necesarios para simular el comportamiento del agua.

- Botella maciza: se trata del modelo más sencillo. Esta botella no tiene cavidad en su interior, pudiendo así ser mallada mediante elementos más sencillos, reduciendo considerablemente el tiempo de cómputo. Al igual que en la anterior se crea un material ficticio con una densidad que provoque una masa total de 1.6 Kg. Para

ello, se repiten los pasos anteriores, obteniendo ahora un volumen (V_{maciza}) de $1.12 \times 10^{-3} m^3$ para la botella maciza. De nuevo se calcula la densidad ficticia (ρ_{maciza}) con la ecuación 4.2.

$$\rho_{maciza} = \frac{m}{V_{maciza}} = \frac{1.6 \text{ Kg}}{1.12 \times 10^{-3} m^3} = 1428.57 \text{ Kg}/m^3 \quad (4.2)$$

Para comparar las tres botellas, en el cálculo de resultados se escoge una variable en un mismo punto de la botella, sin cambiar ninguna de las condiciones de los demás elementos del modelo. En este caso se compara la aceleración máxima en el sentido del eje y (resulta ser la más relevante al ser esta la dirección en la que actúa la gravedad) que sufre la botella en uno de sus puntos.

En la tabla 4.2 se pueden ver los resultados obtenidos, comprobando que no hay grandes diferencias entre ellos, siendo la botella maciza la que provoca la aceleración más desfavorable. Por tanto, la botella escogida para este estudio es la maciza ya que es la que menor tiempo computacional necesita para su simulación. Además, al ser la que presenta un comportamiento más desfavorable, el cumplimiento de ciertas especificaciones de seguridad sobre este modelo, asegura su cumplimiento en los demás, entre los que estaría el caso más real.

TABLA 4.2: ACELERACIONES MÁXIMAS DEPENDIENDO DE LA BOTELLA.

Tipo de botella	$a_{max} (m/s^2)$
Real	1906.53
Vacía	1933.64
Maciza	2172.58

4.1.2. Airbags

Para formar los airbags, primeramente, se crea un cilindro con bases esféricas. Este se corta en el módulo “Assembly” (Ensamblado) con un par de cubos de mayor tamaño y la botella, formando un conjunto como el de la figura 4.2 (a). Una vez obtenido este conjunto, el programa permite seleccionar una de las “parts” y cortarla empleando las demás, proporcionando una “part” final, formada por las zonas de la “part” seleccionada que no contiene ninguna de las demás superpuesta, como ocurre en la figura 4.2 (b). Los cubos se disponen formando el ángulo de botella que se quiera cubrir con un airbag (la botella completa forma 360°). Este ángulo depende del número de airbags que van a cubrir

la botella. La botella para el corte debe ser maciza, ya que si se usara una vacía quedarían partes sin cortar.

En este modelo serán ocho airbags los que cubrirán la botella en sentido longitudinal por lo tanto el ángulo de corte es de 45° ($360^\circ/8=45^\circ$). Una vez se obtiene esta primera pieza (figura 4.2 (b)), que se ajusta perfectamente a la botella, se corta con los cubos de nuevo, obteniendo tres partes distintas. Para crear el airbag longitudinal (figura 4.2 (d)), se colocan dos cubos con la disposición de la figura 4.2 (c). Por otro lado, de la parte cortada inicialmente (figura 4.2 (b)), se obtienen también los airbags superiores e inferiores. Para ello se emplea un único cubo que corta el pate sobrante de esta parte como se observa en la figura 4.2 (e). Mediante este corte se obtiene un airbag superior como el de la figura 4.2 (f). Para obtener el airbag inferior se siguen los mismos pasos que se han seguido para el superior, pero dejando libre la parte inferior de la parte inicial (figura 4.2 (b)). Entre todos suman un total de veinticuatro airbags, ocho longitudinales, ocho en la parte superior y ocho en la base.

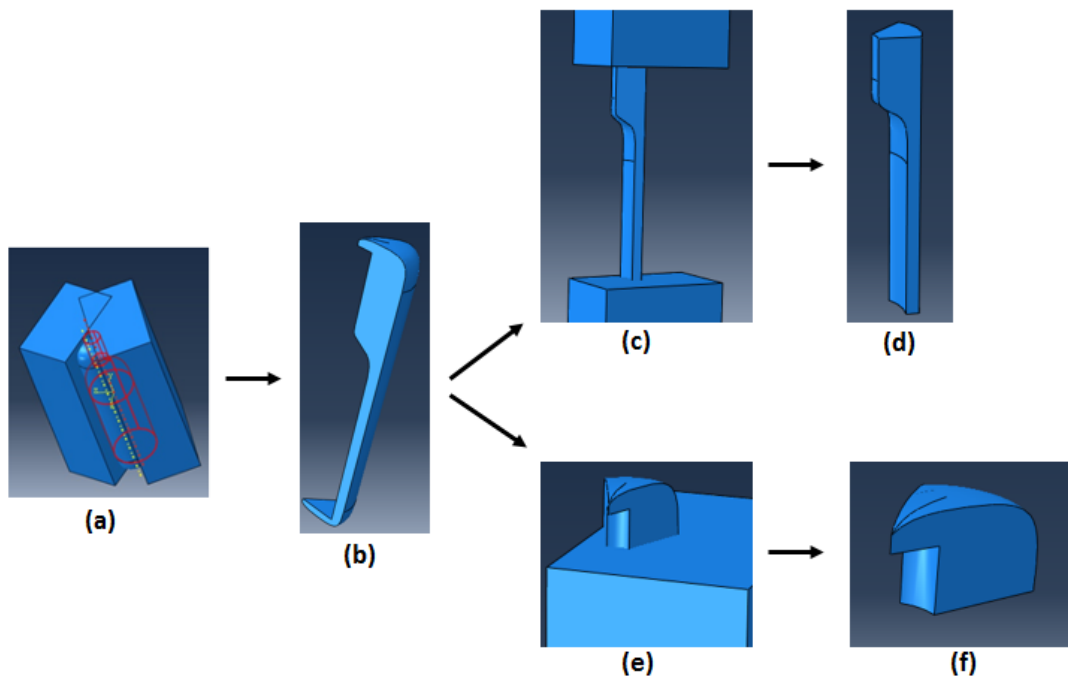


Figura 4.2: Construcción airbags. (a) Conjunto inicial. (b) Parte inicial. (c) Corte airbag longitudinal. (d) Airbag longitudinal. (e) Corte airbag superior. (f) Airbag inferior.

Antes de continuar, hay que transformar estas partes, que inicialmente fueron creadas como sólidas, en partes tipo “Shell” (concha o cáscara) para vaciarlas y obtener el airbag. Este paso se realiza en el módulo “Part”.

Una vez que se han realizado los airbags, se crea el material del que están hechos, con una sección apropiada. La sección es de tipo “Shell” y membrana, con un espesor de una

décima de milímetro [26], y el material usado es polietileno y presenta las características mostradas en la tabla 4.3, [25].

TABLA 4.3: PROPIEDADES DEL POLIETILENO.

Material	Densidad (Kg/m ³)	Modulo Elasticidad (GPa)	Coeficiente de Poisson (-)	Límite elástico (MPa)	Endurecimiento (MPa)
Polietileno	970	2.7	0.45	25	20

Para definir el comportamiento plástico de un material, Abaqus® pide al menos dos puntos de esta zona plástica, definidos por la deformación plástica y la tensión que hay que aplicar para que esta se produzca. Se define el punto inicial y el final. En el inicial la deformación plástica es nula aún y la tensión corresponde al límite elástico. En el final la deformación será la unidad y la tensión se calcula mediante la constante de endurecimiento que es la pendiente de la zona plástica, si asemejamos está a una recta como la de la figura 4.3, empleando la ecuación 4.3.

$$\varepsilon_{p,final} = 25 + 20 \times 1 = 45MP \quad (4.3)$$

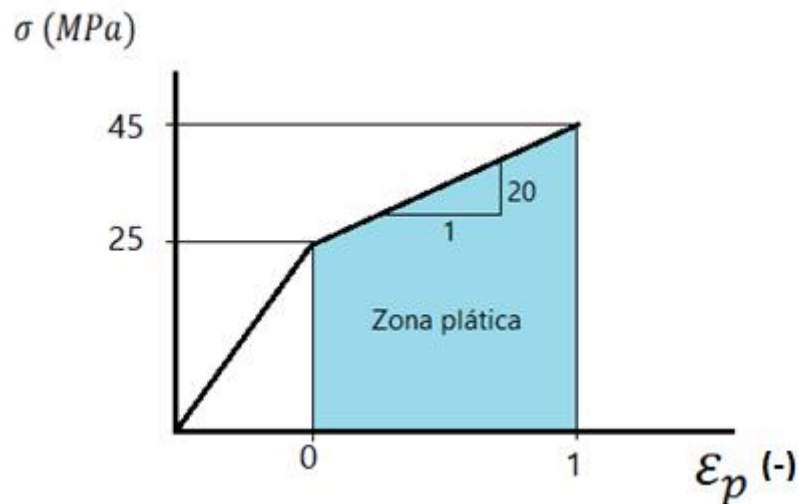


Figura 4.3: Comportamiento del polietileno.

Posteriormente se generan las superficies necesarias para crear la unión entre airbags, entre cada airbag y la botella y las superficies interiores que van ligadas a la cavidad fluida en la que se introducirá el aire a presión.

4.1.3. Suelo

Para la simulación del suelo, se crea una superficie rígida mediante el comando “Analytical rigid” (Analítico rígido) con unas dimensiones muy grandes en comparación con el conjunto botella-airbags. Las partes rígidas analíticas se suelen usar en análisis de contactos. Si es posible describir una pieza rígida con esta opción, es aconsejable ya que simplifica considerablemente el análisis del problema reduciendo tiempos de cálculo, pero solo se puede utilizar en piezas de perfil uniforme. En este tipo de partes no influyen las propiedades del material por lo que no es necesario asignárselo. Otro tipo de partes rígidas son las discretas, las cuales pueden ser de cualquier forma arbitraria, pero necesitan la asignación de material, sección y mallado [27]. En este caso en el que el suelo ocupa gran parte del espacio y puede ser simulado como una pieza uniforme, se puede simular como una parte rígida analítica.

Por otro lado, hay que restringir sus desplazamientos y rotaciones en todos los ejes. Esto se hace en el módulo “Load” (Carga), creando una restricción de movimientos de tipo “Displacement/Rotation” (Desplazamientos/Rotación) en alguno de sus puntos. En el punto en el que se crea la restricción, previamente es necesario crear un “Reference Point” (Punto de referencia). Además, se genera una superficie seleccionando la cara que impacta con el conjunto para posteriormente generar este contacto entre el conjunto y el suelo.

4.2. Disposición

En este primer modelo hay tres tipos de airbags diferentes, laterales, inferiores y superiores. El conjunto se compone de varios airbags de cada tipo, pero no es necesario hacerlo uno por uno. Abaqus® dispone de la opción de realizar un patrón en el que se puede repetir un elemento las veces que quieras de forma circular o lineal. En este caso la opción adecuada es hacer uno circular, alrededor del eje longitudinal de la botella, cubriendo los 360° que forma la botella. Así se pueden colocar los ocho airbags de cada tipo, ajustándolos a la botella de forma rápida y sencilla, consiguiendo la configuración deseada como se ilustra en la figura 4.4. En este modelo, el espacio interior mínimo en los airbags longitudinales es de 11.5mm y de 5mm en los inferiores y superiores. Además, de esta forma se crean automáticamente las distintas superficies creadas en cada airbag original, evitando tener que repetir la creación de estas en cada uno, algo que resulta tedioso si se trata de un modelo con un alto número de airbags.

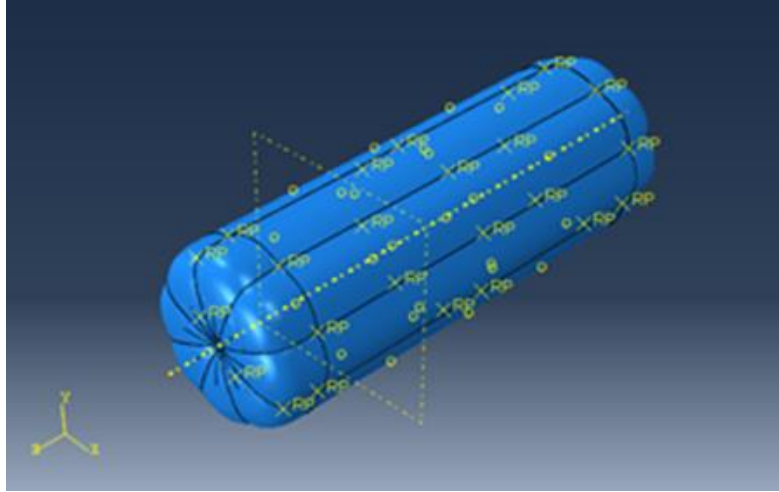


Figura 4.4: Disposición de los airbags.

Una vez formado el conjunto botella-airbags, se coloca el elemento rígido o suelo lo más cerca posible del conjunto para ahorrar tiempo computacional. Se debe considerar el hecho de que los airbags, inicialmente, aparecen con su forma original, sin presión en su interior. Una vez comienza la simulación, estos pueden aumentar debido a la presión, tocando el suelo antes de tiempo. Para la primera simulación parece razonable colocar el suelo a 5mm del conjunto.

Según la orientación de caída el impacto varía, proporcionando resultados distintos, por lo que cuantas más pruebas se hagan más completo será el estudio, cubriendo un abanico de orientaciones lo más amplio posible.

En la figura 4.5 se muestra una vista cortada del modelo en la que se puede apreciar la orientación del conjunto botella-airbags respecto al suelo además de las cavidades interiores.

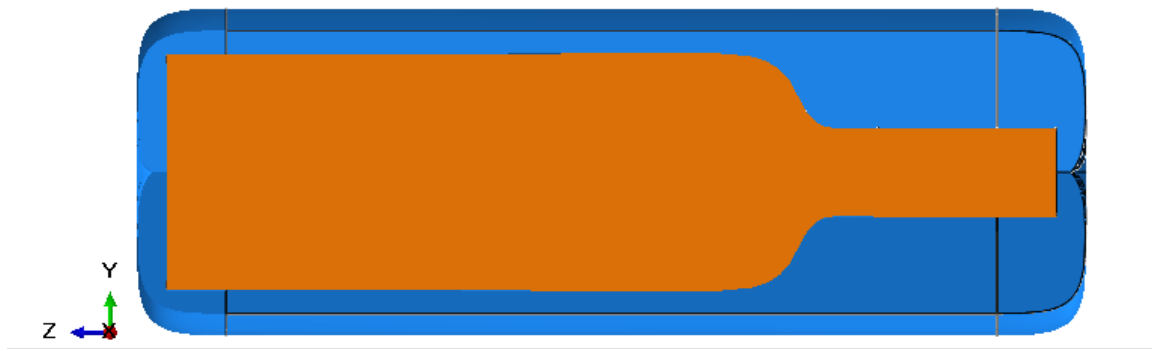


Figura 4.5: Vista del modelo cortado.

4.3. Mallado y tipos de elementos

Una vez se tiene todas las partes del modelo a estudiar, se realiza el mallado adecuado para sus propiedades. Esta es una de las partes más importantes del proceso de estudio ya que, si no se realiza correctamente, influirá en los resultados obtenidos, pudiendo resultar erróneos o imprecisos.

Este mallado se puede llevar a cabo de dos formas distintas, mallar todas las partes a la vez, como conjunto, o mallar cada “part” distinta que contenga el modelo. Si se trata de un modelo formado por muchas partes diferentes y con los mismos tipos de elementos es más cómodo mallarlas como conjunto, haciendo todas ellas independientes (“Make Independent”). Si por lo contrario lo forman una repetición de partes iguales o estas partes tienen tipos de maya distintos, resulta más cómodo hacerlo de forma individual, marcando estas como dependientes (“Make dependent”). Esto significa que todas las partes del conjunto que sean iguales a la original dependen de ella y por tanto un cambio en el mallado de la parte original conlleva el mismo cambio en sus copias.

En este primer caso lo mejor es hacerlo de forma individual, ya que solo hay tres tipos de airbags y la botella. El suelo, al igual que no necesita definición de propiedades por tratarse de un cuerpo rígido analítico, tampoco necesita mallado.

A continuación, se analizan los tipos de elementos empleados en el mallado de los modelos utilizados en este estudio. También se muestra el análisis de malla, realizado con este primer modelo, pero aplicable al resto de modelos estudiados.

4.3.1. Elementos hexaédricos tridimensionales

En este problema, la botella se considera un cuerpo rígido que no sufre deformaciones en el impacto, ya que se supone que los airbags funcionan correctamente. Además, se trata de un cuerpo homogéneo, por lo que las propiedades del material no cambian en ninguna zona. Todo esto simplifica considerablemente los cálculos al poder usar un tipo de elemento sencillo.

Los elementos usados para este mallado se denominan C3D8R. Se tratan de elementos lineales de tipo ladrillo, continuos (C), tridimensionales (3D), con ocho nodos (8) y de integración reducida (R). Este tipo de integración se realiza en un único punto situado en el centro del elemento como se ve en la figura 4.6, [28]. Así se evitan problemas de bloqueo, que presentan un aumento de la rigidez del elemento. Además, reduce el tiempo de cálculo a costa de perder precisión en la integración de la matriz de rigidez. Esto es una gran ventaja ya que se disminuye el coste computacional, pero tiene sus inconvenientes:

- Al realizar la integración en un solo punto, se requiere el uso de elementos pequeños para lograr un análisis adecuado. Son en estos puntos, donde se obtienen los distintos parámetros con mayor precisión.
- Este elemento no suele ser lo suficientemente rígido a la hora de doblarse.

- Puede aparecer un problema llamado “Hourglass” (Reloj de arena) que da lugar a modos de deformación nula en los puntos de integración. Para evitar esto y que se produzcan deformaciones y tensiones innecesarios y problemas relacionados con la obtención de soluciones oscilatorias, se utiliza un control de “Hourglass” en los elementos empleados. [29].

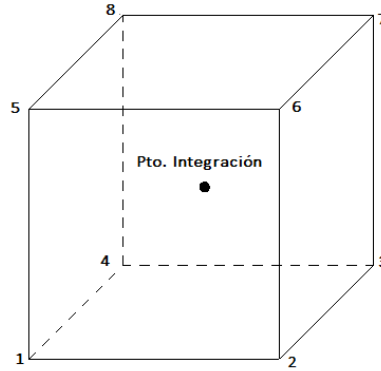


Figura 4.6: Elemento C3D8R, [28].

4.3.2. Elementos tetraédricos tridimensionales.

El programa no permite mallar la botella hueca (tanto en el caso real como en el de la botella vacía) con elementos hexaédricos tridimensionales (C3D8R) debido a su geometría. Para tal botella hay que utilizar elementos tetraédricos tridimensionales denominados C3D10M. Los elementos triangulares y tetraédricos son geoméricamente más versátiles que los cuadriláteros y hexaédricos, pero necesitan mayor tiempo computacional debido a su menor tasa de convergencia.

Los elementos tetraédricos (C3D10M) son menos sensible a la forma de la pieza, permitiendo el mallado de geometrías complejas, mientras que los hexaédricos (C3D8R) solo funcionan adecuadamente si se adaptan con precisión a la geometría del cuerpo, dificultando el mallado de la botella hueca.

Con el uso de elementos tetraédricos se requieren mallas extremadamente finas, con gran cantidad de elementos para obtener resultados precisos, aumentando por tanto el tiempo computacional de la simulación [27].

4.3.3. Elementos tipo membrana

Los elementos de tipo membrana son elementos superficiales que equilibran las tensiones y transmiten las fuerzas en el plano, pero no los momentos, y carecen de rigidez a flexión, ideal para representar superficies delgadas en el espacio, con estas características, como es el caso de los airbags.

Se denominan como M3D4R, elementos tipo membrana (M), tridimensionales (3D), con cuatro nodos (4) e integración reducida (R).

4.3.4. Análisis de malla

La precisión de los resultados se puede considerar directamente proporcional al tamaño de los elementos usados a la hora de mallar. El método de los elementos finitos se basa en un cálculo aproximado, discretizando y dividiendo en pequeñas partes las piezas a estudiar. Cuanto más pequeños sean estos elementos, mejor se adaptarán a la geometría de las piezas, aproximando así los resultados a los reales. Esto también depende del comportamiento y los esfuerzos a los que están sometidos las piezas analizadas. En el caso de impactos, las zonas que entran en contacto son las más solicitadas y por tanto deben tener un mallado más preciso.

Al disminuir el tamaño de los elementos cada vez más, las diferencias entre resultados comienzan a ser menores, llegando a un punto en el que se pueden considerar despreciables.

La disminución del tamaño de los elementos provoca el aumento de su número para conseguir cubrir todo el modelo. Esto conlleva un mayor tiempo de cálculo, siendo considerable cuando se tratan casos complejos. Para evitar tiempo de cálculo innecesario, se realiza un análisis de malla antes de ponerse a simular pruebas. Esto se consigue analizando como varía un mismo parámetro con la disminución del tamaño característico de los elementos o con el aumento de los nodos, hasta obtener un error relativo aceptable. Este error relativo puede variar según la precisión que se quiera en el estudio. Si se trata de un proyecto con cierto riesgo, se busca el menor error posible, aunque haya que invertir en coste computacional, pero si no es así o se quiere hacer un pre-estudio, para hacerse a la idea del comportamiento y las posibles respuestas, son aceptables errores mayores.

En este caso se compara la variación en la aceleración máxima medida en un mismo punto de la botella. El parámetro independiente es el tamaño característico del elemento. Si las pruebas que se piensan hacer son del mismo modelo también podría usarse como parámetro independiente el número de nodos, pero en este estudio se realizaran pruebas con distintos modelos, con geometrías y dimensiones diferentes, por lo que, si se usa un mismo número de nodos, los elementos cambiarían considerablemente de tamaño al cambiar el tamaño de los airbags, provocando una mala discretización.

En los resultados mostrados en la tabla 4.4, se puede observar que a partir de un tamaño característico de 0.004 los valores obtenidos empiezan a aproximarse, consiguiendo entre los tamaños 0.003 y 0.002 un error relativo del 1.68%.

De forma visual esta variación se parecía mejor, por lo que resulta interesante representar estos datos en una gráfica. La disminución del tamaño cada vez es menor, al acercarse al valor final, acumulando muchos puntos cercanos en la convergencia de la gráfica. Por tanto, para una mejor visualización de esta convergencia, se representa la aceleración frente a las simulaciones, correspondiendo cada número de simulación al tamaño correspondiente de la tabla 4.4 (figura 4.7).

TABLA 4.4: VALORES DEL ANÁLISIS DE MALLA.

N.º Simulación	Tamaño característico del elemento (-)	Aceleración máxima (m/s^2)	Error relativo (%)
1	0.05	10543.3	
2	0.04	9609.12	9.72
3	0.03	11052.2	13.06
4	0.02	7676.6	43.97
5	0.01	10455.2	26.58
6	0.008	9735.18	7.40
7	0.006	8930.52	9.01
8	0.004	8580.76	4.08
9	0.003	8294.76	3.45
10	0.002	8157.49	1.68

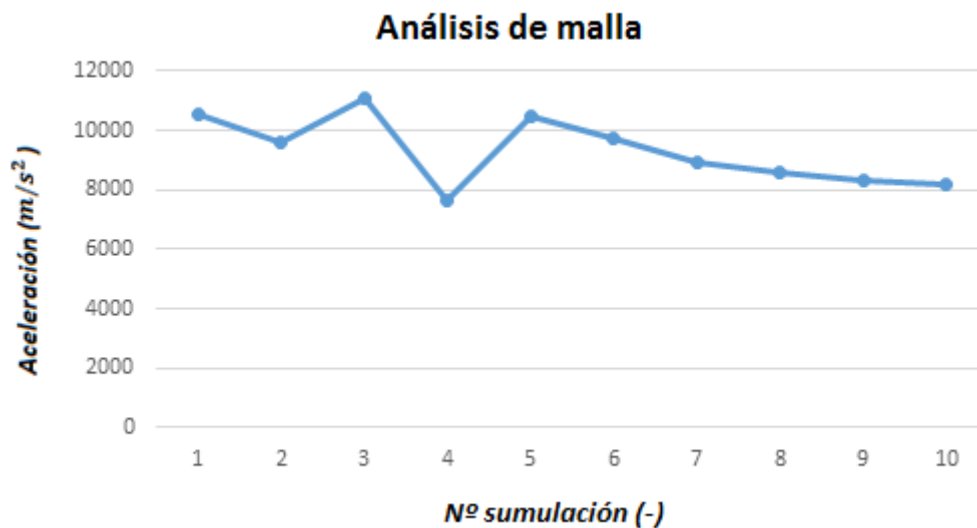


Figura 4.7: Análisis de malla.

Como se ha mencionado anteriormente, los lugares donde más fina debe ser la malla es en las zonas de contacto. Si se supone un correcto funcionamiento del sistema, la botella no debe contactar con el suelo. Debido a esto resulta interesante comprobar la variación

de los resultados al aumentar el tamaño característico de los elementos de esta. Se realizan varias pruebas obteniendo los resultados de la tabla 4.5. Se puede comprobar que al principio el error relativo comparando el resultado aceptado en el análisis anterior con los nuevos es mínimo y aumenta a partir de un tamaño característico de 0.006.

TABLA 4.5.: ANALISIS DE LA MALLA DE LA BOTELLA.

N.º Simulación	Tamaño característico del elemento (-)	Aceleración máxima (m/s^2)	Error relativo (%)
1	0.003	8294.76	
2	0.004	8193.45	1.221
3	0.005	8176.82	1.221
4	0.006	8101.25	1.422
5	0.007	8040.27	2.005
6	0.1	8012.27	3.406
7	0.13	8585.48	3.505

Se podría simplificar aún más comprobando si no hay diferencia al aumentar el tamaño característico de los elementos de los airbags que no entran en contacto con el suelo. Como se realizarán prueba con distintas orientaciones habría que realizar cambios en la malla para cada una de ellas así que esta simplificación no resulta apropiada para este estudio.

4.4. Ligaduras y contactos

Una vez situados los airbags se ligan estos entre sí y con la botella. Esto se realiza en el módulo “Interaction” (Interacción). Se crea una restricción de tipo “Tie” (ligadura), por cada contacto entre superficies. Para ello hay que elegir una superficie maestra, que será la que pertenezca a la parte más rígida, y otra esclava. En el caso de la unión entre la botella y un airbag, la superficie exterior de la botella será la maestra y la del airbag la esclava. En la ligadura entre dos airbags se puede escoger como maestra cualquiera de las dos superficies.

Para el contacto provocado en el impacto se crea en este mismo módulo una interacción de tipo “General contact” (Contacto general) y seleccionar un par de superficies, que serán las que puedan entrar en contacto, por tanto, se seleccionan la superficie del suelo y una que englobe los airbags y la botella. Si el modelo funciona correctamente, la botella

no debe entrar en contacto con el suelo, pero como a priori no se sabe, si no incluimos está en la superficie seleccionada y entra en contacto con el suelo, en los resultados no se reflejará.

Este tipo de interacciones necesitan ciertas propiedades. En este caso se le asigna un contacto normal de tipo “Hard contact” (Contacto duro) y otro tangencial de tipo “Penalty” (Penalización) con un coeficiente de fricción de 0.2. La relación de contacto “dura” minimiza la penetración de la superficie esclava en la superficie maestra y no permite la transferencia de tensión de tracción a través de la interfaz, [27].

El método de contacto de penalización se usa para imponer restricciones de contactos entre un par de superficies. Abaqus/Explicit, resiste las penetraciones entre estas superficies aplicando una rigidez de “resorte” en los nodos penetrantes. Esta rigidez relaciona la distancia de penetración con la fuerza y es escogida automáticamente por el programa. Se permite una pequeña penetración, pero resulta insignificante en la mayoría de los casos. Por este motivo, cuando se obtienen los resultados se puede ver los airbags penetran en el suelo (Figura 4.8), pero una distancia mínima que resulta irrelevante para este estudio, [27].

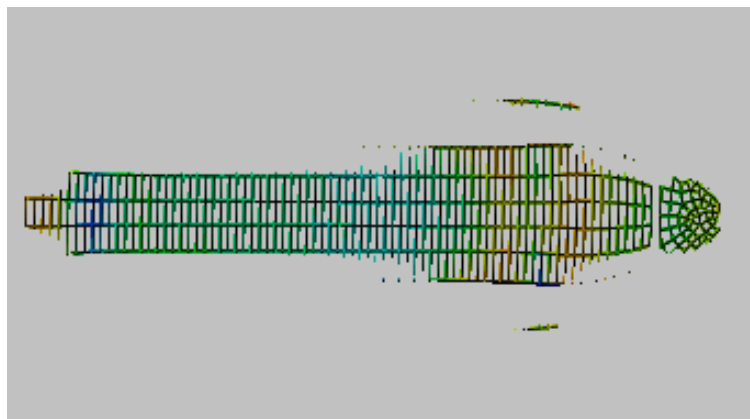


Figura 4.8: Contacto tipo “Penalty”.

4.5. Cavity fluida

Para introducir aire a presión en el interior de los airbags se crea una interacción de tipo “Fluid cavity” (Cavidad fluida) para cada uno y vincularla a su superficie interior, creada al principio. Se introduce un valor de presión ambiental de 0 MPa, así la presión introducida será considerada manométrica. Es importante tener esto en cuenta a la hora de interpretar los resultados finales. A la hora de fabricar estos airbags la presión introducida debe ser la obtenida en el estudio más la presión atmosférica. Con esto se consigue un estudio más versátil, con posibilidad de adaptarse a casos con distintas presiones ambientales.

Esta interacción necesita la definición de las propiedades del aire introducido. En este caso es un fluido neumático, ya que se trata de aire con las propiedades mostradas en la tabla 4.6.

TABLA 4.6: PROPIEDADES DEL AIRE

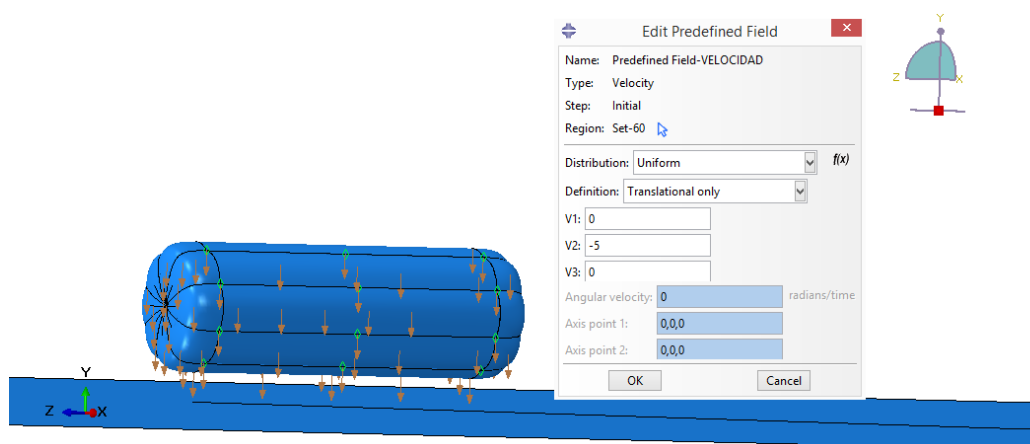
Peso molecular (Kg/mol)	Capacidad calorífica (J/mol/K)
0.02896	28.96

Una vez creadas todas las interacciones se introduce la presión mediante un “Predefined Field” (Campo predefinido) para cada interacción en el “step” (Paso) inicial, que viene por defecto. Para la primera prueba se introduce un valor de presión de 20 KPa. Posteriormente esta se varia para observar cómo influye en los resultados.

4.6. Asignación de la velocidad

Para provocar el impacto entre el conjunto y el suelo hay que asignarle a todo el cuerpo una velocidad con la dirección y el sentido adecuados. Los valores obtenidos para dicha velocidad se encuentran desarrollados anteriormente en el subcapítulo 3.6.

Para asignar esta velocidad en Abaqus® se crea un “Predefined Field” en el “step” inicial, (al igual que cuando se introduce la presión en los airbags) de tipo velocidad e introducir esta en la dirección perpendicular al suelo y en la dirección que provoca el choque (en este caso se trata del sentido negativo de la dirección “y”). Esta es asignada al total del conjunto como se puede ver en la figura 4.9. Esta velocidad será de tipo traslacional y uniforme. Se introduce como valor (m/s) negativo en la dirección “y” para que actúe en el sentido negativo de esta.

Figura 4.9: Velocidad (m/s).

4.7. Step

Para este tipo de simulaciones se usa un tipo de “step” (paso) dinámico y explícito. A este hay que asignarle un tiempo de cálculo. Es suficiente con el tiempo que dure el impacto. Conociendo la velocidad y la distancia a la que se encuentra el conjunto del suelo se puede estimar el tiempo necesario para que se complete el impacto. En este problema el valor del tiempo de impacto estará entre 0.1 y 0.2 segundos. Para comenzar se ponen 0.2 asegurando que este se complete y al obtener los resultados se ve en que momento cambia la dirección del movimiento. A partir de este instante los resultados no son relevantes y se puede prescindir de ellos.

En este módulo también se seleccionan los resultados que se quieren obtener. Hay dos métodos de obtención de resultados, mediante un “Field output” (Salida de campo) o un “History output” (Salida de historial). En la salida de campo, el programa produce la salida de resultados en todos los puntos del modelo, mientras que con la salida de historial lo hace solo en los puntos indicados por el usuario, ahorrando así una gran cantidad de tiempo computacional. Además, se escoge un número de intervalos en los cuales se muestran el comportamiento del modelo. Cuanto mayor sea este número, más precisos serán los resultados y las gráficas obtenidas. Cuando se necesita esta precisión en los resultados, estos se obtienen mediante una salida de historial calculada únicamente en los puntos deseados y con un número de intervalos alto. Para ver el comportamiento del conjunto se puede crear una salida de campo de los desplazamientos y tensiones, creando una secuencia de imágenes de la caída, obteniendo más imágenes cuanto mayor sea el número de intervalos. Hay que tener en cuenta que, al tratarse de una salida de campo, guarda resultados de todos los puntos del modelo por lo que el archivo creado pesará mucho si se usan muchos intervalos.

Por otro lado, la obtención de las aceleraciones, fuerzas y del área en contacto se consiguen con salidas de historial. Para el estudio de las aceleraciones se usa el parámetro ACOM, que es la aceleración traslacional equivalente de un cuerpo rígido. Para ello se crea un “set” (conjunto) de nodos que engloba a la botella. En el caso del área en contacto se emplea el parámetro CAREA, que proporciona el área total, de la superficie seleccionada, que entra en contacto durante la simulación. En este caso la superficie seleccionada es la del conjunto de airbags, que será útil además para la obtención de las fuerzas que aparecen sobre el conjunto. Los parámetros usados se denominan CFN, para las fuerzas normales, CFS para las tangenciales y CFT para obtener el módulo de estas.

4.8. Postproceso

Por último, se ejecuta el modelo en el módulo “Job” (Trabajo). Antes de ejecutar conviene chequearlo para saber si hay algún error en la construcción del modelo. Una vez comienza la ejecución el programa también puede detectar errores, finalizando la simulación, pero a veces estos pueden aparecer tarde provocando un gasto de tiempo computacional innecesario.

Una vez acabada la ejecución, se pueden obtener los resultados en el módulo “Visualization” (Visualización).

4.8.1. Desplazamientos y tensiones

Como se ha explicado en el subcapítulo anterior, los desplazamientos y tensiones se obtienen con una salida de campo por lo que se pueden apreciar visualmente como en la secuencia de la figura 4.10. Con cuatro ilustraciones es fácil hacerse a la idea del comportamiento del conjunto, comenzando cerca del suelo (Figura 4.10 (a)), produciéndose el contacto en el suelo en el segundo 0.00189 de la simulación (b), llegando al máximo contacto en el segundo 0.00862 (c) y por último despegándose del suelo (d).

El valor de las tensiones es el correspondiente a la tensión equivalente de Von Mises y se emplea para comprobar que no se produce plastificación en los airbags antes del impacto, simplemente por la presión introducida. En este caso plastifica para el espesor escogido, produciéndose una tensión de 25.85 MPa antes de impactar como puede verse en la figura 4.11. La tensión de plastificación del polietileno es de 25 MPa. Como se tratan de resultados aproximados, es recomendable usar un coeficiente de seguridad, pero en este estudio se verá que los casos aceptables se alejan de la tensión de plastificación por lo que no será necesario el uso de este coeficiente.

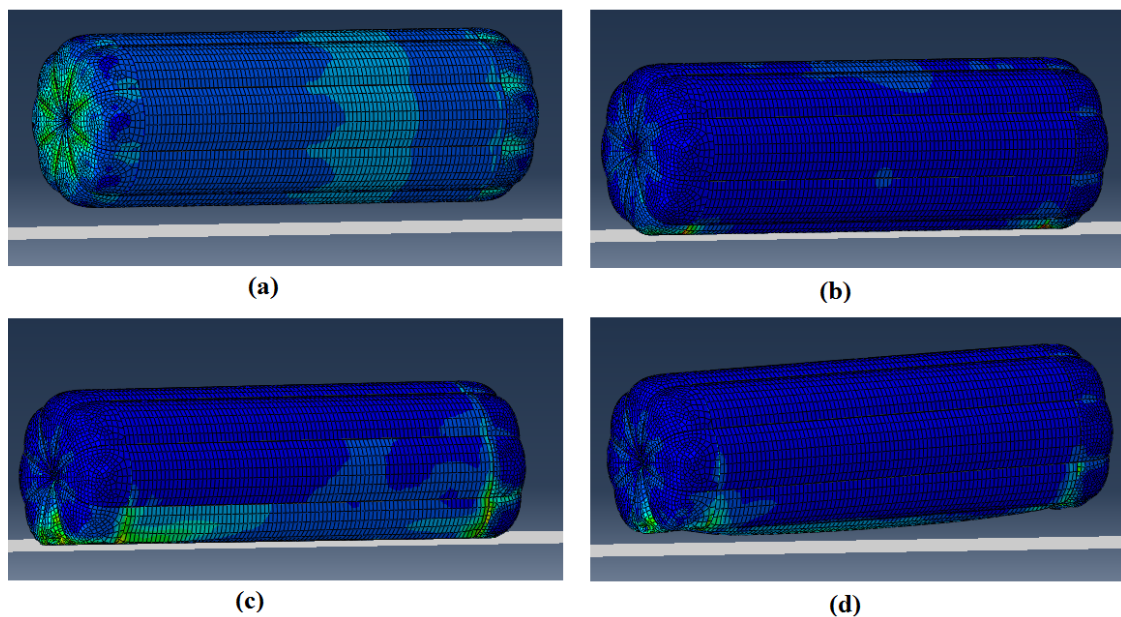


Figura 4.10: Secuencia de impacto.

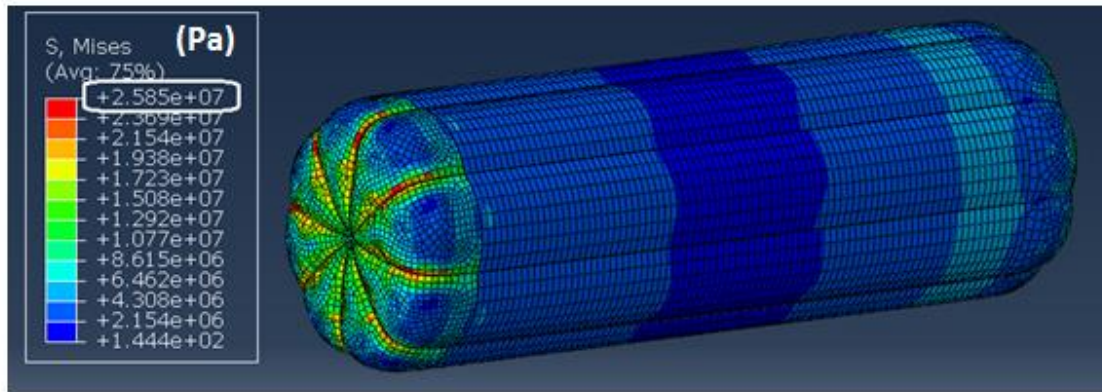


Figura 4.11: Tensiones de Von Mises del conjunto.

4.8.2. Aceleraciones

Como se ha mencionado anteriormente, el parámetro empleado para medir las aceleraciones sufridas por la botella se denomina ACOM. Este parámetro se puede obtener en las tres direcciones del espacio, ACOM1 para el eje “x”, ACOM2 para el “y” y ACOM3 para el eje “z”.

Con la geometría y presión escogidas en este primero modelo la botella golpea en el suelo dos veces. En la realidad, con el primer golpe se rompería, sin llevarse a cabo el segundo. Al producirse el golpe aparecen tensiones altas en la botella lo que provoca su ruptura. El primer golpe se produce en la base de la botella, ya que es la zona de mayor masa. En la figura 4.12. se muestran los picos de aceleraciones provocados por los dos golpes (a) y las tensiones que aparecen como consecuencia del primer (b) y segundo (c) golpe.

Este primer modelo no es aceptable con las características seleccionadas por lo que hay que variarlas de forma que la botella no golpee con el suelo, viendo cómo influye la variación de cada una de sus características en las aceleraciones obtenidas.

Para poder interpretar los resultados de este primer modelo y realizar simplificaciones antes de comenzar con el estudio, es necesario conseguir estos resultados sin tener en cuenta el golpe, ya que en los modelos aceptables la botella no entrara en contacto con el suelo. Para ello se excluye la superficie de la botella de la interacción conjunto-suelo, obteniendo los valores que se muestran en los siguientes subcapítulos.

Al comparar los resultados de estas tres aceleraciones se puede llegar a la conclusión de que, durante el impacto, la correspondiente al eje “y” destaca sobre las demás como se verifica en la figura 4.13. Por lo tanto, se estudiará únicamente el parámetro ACOM2, ahorrando así tiempo computacional.

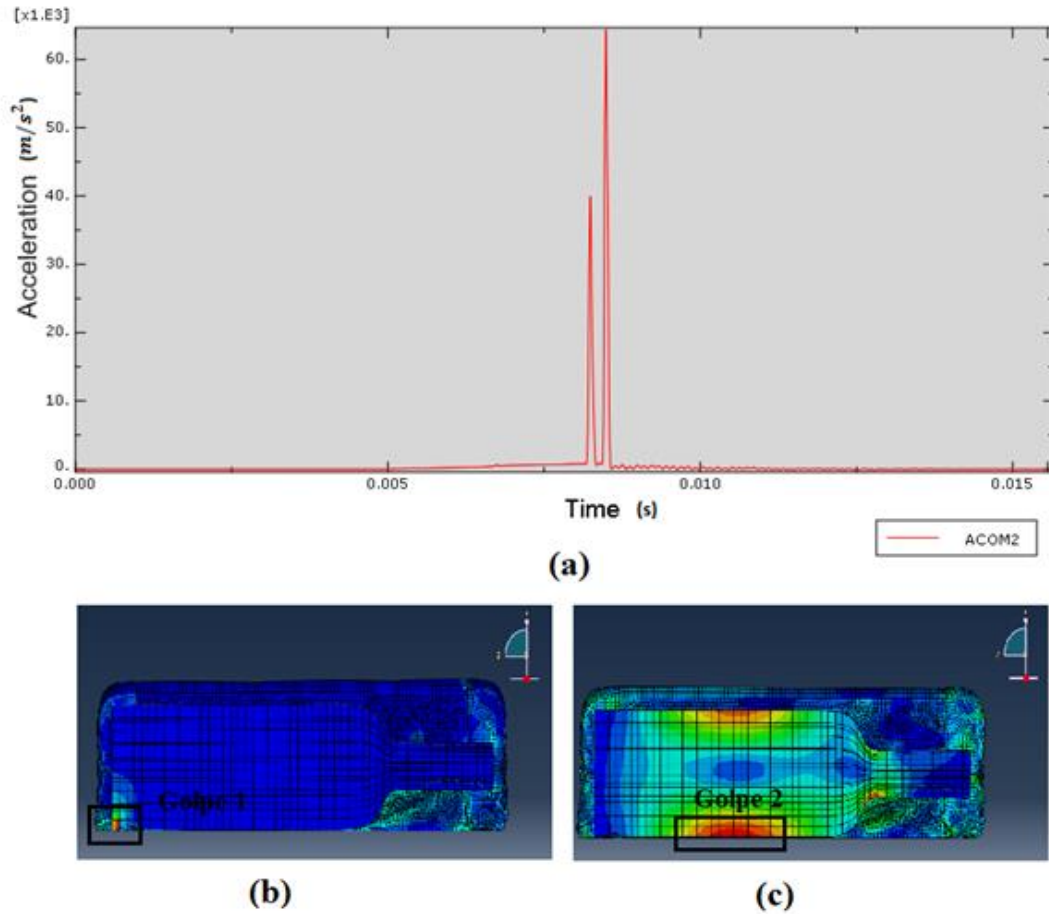


Figura 4.12: Golpes con el suelo. (a) Visualización de los dos golpes mediante picos en la aceleración de la botella en el eje “y” (ACOM2). (b) Tensiones provocadas por el primer golpe. (c) Tensiones provocadas por el segundo golpe.

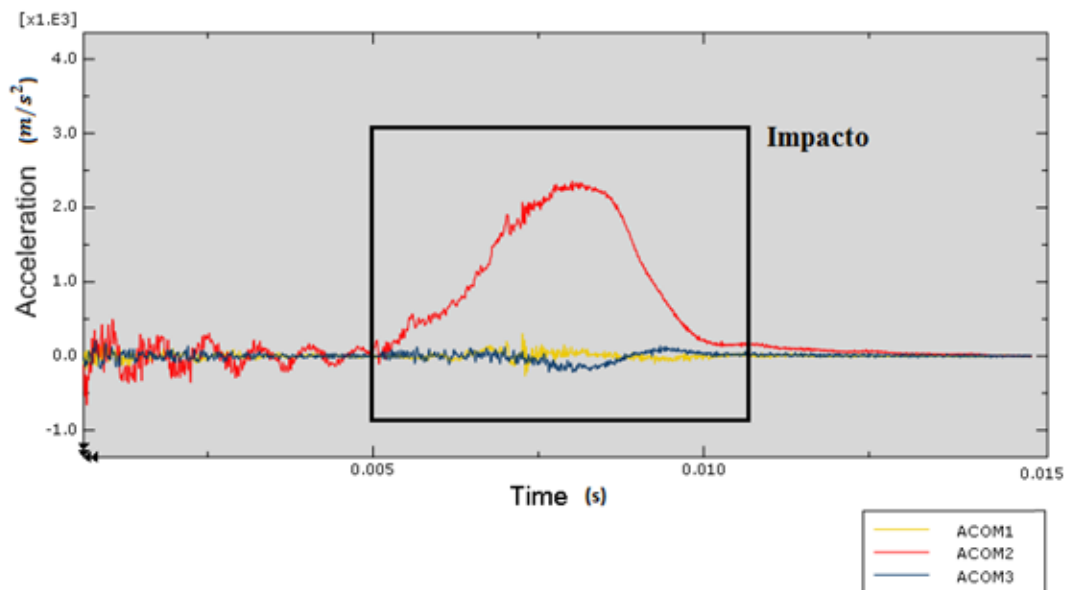


Figura 4.13: Aceleraciones sufridas por la botella (ACOM1 en el eje “x”, ACOM2 en el eje “y” y ACOM3 en el eje “z”).

Según los resultados obtenidos, aparecen aceleraciones antes de que se produzca el impacto. Esto se debe a que en el instante cero de la simulación, la presión contenida en los airbags es nula. Nada más comenzar la simulación aparece esta presión provocando aceleraciones que resultan irreales, ya que en el caso real los airbags tendrían presión en todo momento. Si la geometría de los airbags fuese sencilla y se pudiese calcular analíticamente la tensión debida a la presión, se evitaría la aparición de estas aceleraciones, aplicando una pretensión a la superficie de los airbags. De este modo cuando apareciese la presión, esta no influiría en la tensión soportada por los airbags y por tanto las aceleraciones antes del impacto serían nulas (en la simulación no está presente la gravedad). En los modelos estudiados no es posible realizar este cálculo analítico, pero se consideran las aceleraciones iniciales irrelevantes en comparación con las que se producen durante el impacto.

4.8.3. Fuerzas

Parece interesante analizar las fuerzas producidas por el impacto. Se obtienen dos tipos de fuerza en la simulación, tangenciales, CFS1, CFS2, CFS3, y normales, CFN1, CFN2, CFN3, correspondientes a los ejes “x”, “y”, “z” respectivamente. En las fuerzas normales, la importante es la que se produce en el eje “y” (dirección del impacto), siendo las otras dos nulas como se aprecia en la figura 4.14. Con las fuerzas tangenciales ocurre lo contrario, la producida en el eje “y” es nula mientras en las otras dos direcciones si aparecen fuerzas, aunque se pueden despreciar si se comparan con la fuerza normal como se comprueba en la figura 4. 15.

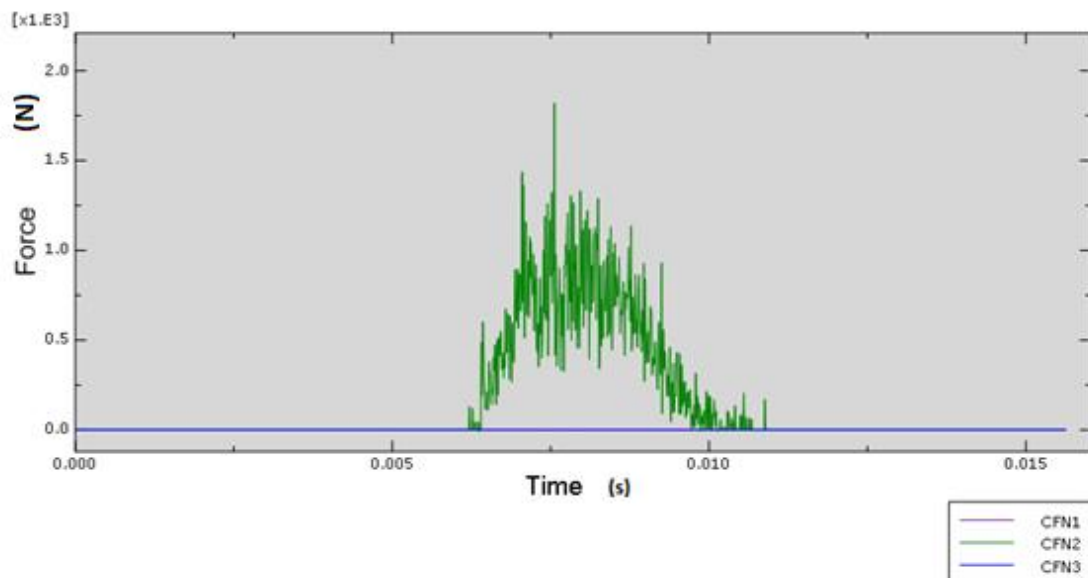


Figura 4.14: Fuerzas normales (CFN1 en el eje “x”, CFN2 en el eje “y” y CFN3 en el eje “z”).

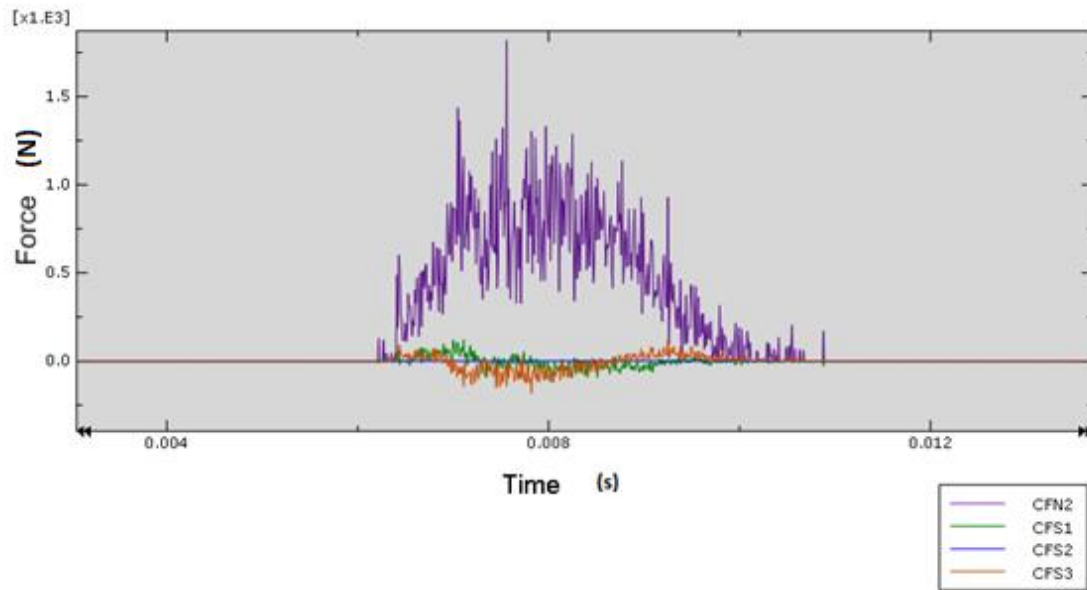


Figura 4.15: Comparación de CFN2 (fuerza normal en el eje “y”) con las fuerzas tangenciales (CFS1 en el eje “x”, CFS2 en el eje “y” y CFS3 en el eje “z”).

El objetivo de este sistema es proteger la botella de fuerzas que puedan dañarla. Estas fuerzas son directamente proporcionales a la masa y la aceleración del conjunto. Como la botella estudiada es la misma en todos los casos y la masa de los airbags se puede considerar despreciable, la masa resulta constante. Por lo tanto, las fuerzas dependen de las aceleraciones que aparezcan durante el impacto como se puede comprobar comparando los resultados de aceleraciones y fuerzas obtenidos. En la figura 4.16 se muestra el módulo de las fuerzas producidas en la dirección “y”, CFT2, (la más relevante) y las aceleraciones que aparecen en esta misma dirección, apreciando cierta proporcionalidad entre ambas.

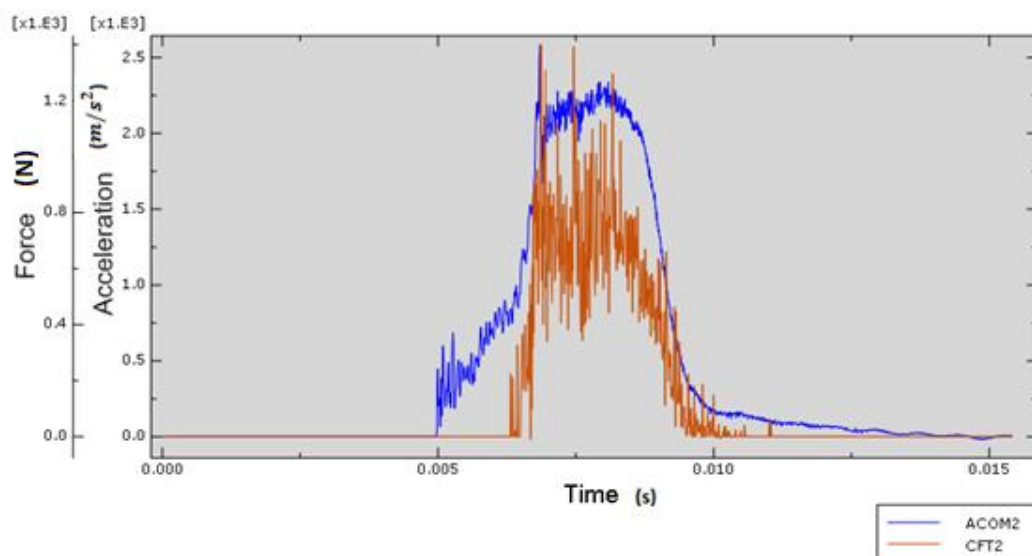


Figura 4.16: Relación entre el módulo de las fuerzas en el eje “y” (CFT2) y las aceleraciones de la botella en el eje “y” (ACOM2).

4.8.4. Área total de contacto.

Otro de los parámetros de los que depende la magnitud de las aceleraciones es el área total que entra en contacto con el suelo y la forma en la que este contacto se lleva a cabo.

Por tanto, resulta interesante estudiar este parámetro, el cual depende de la geometría del airbag, por lo que ayudará a realizar cambios adecuados en dicha geometría. Como se verá en el capítulo de análisis de resultados, las aceleraciones dependen de la progresión de este contacto y no de la cantidad de área de contacto en sí. Si se produce, de golpe, un pico en el área de contacto, en las aceleraciones también se producirá, aumentando la aceleración máxima del modelo. En este caso, y con la orientación de caída usada, se produce una progresión regular del área de contacto y por tanto también de la aceleración (Figura 4.17).

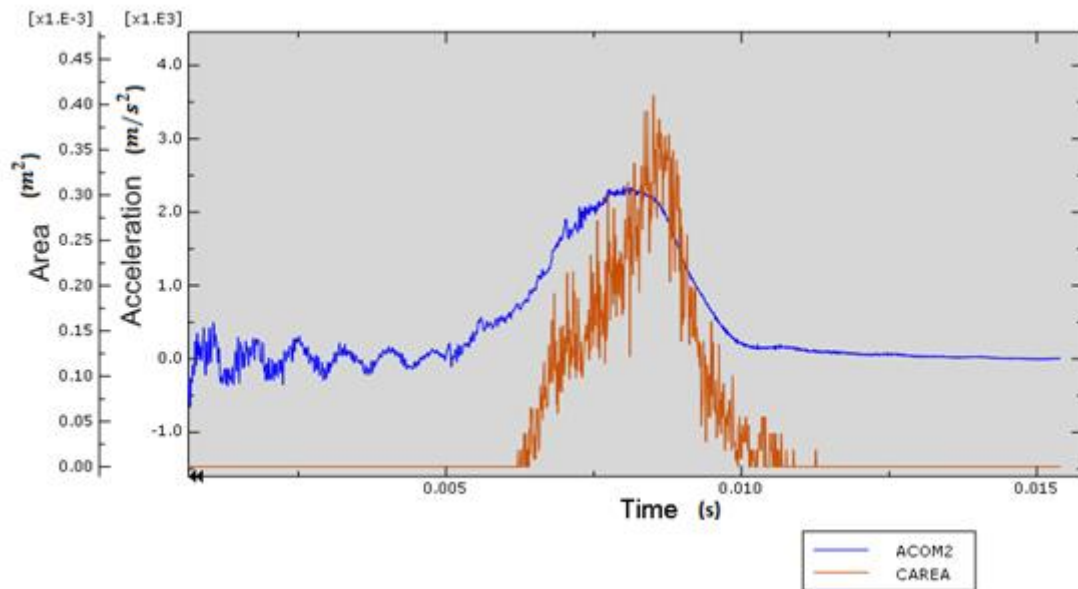


Figura 4.17: Relación entre área de contacto (CAREA) y las aceleraciones de la botella en el eje “y” (ACOM2).

5. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los distintos modelos propuestos, analizando qué partes protegen más eficientemente la botella y por qué, tratando de encontrar patrones de comportamiento en estos conjuntos de airbags.

Para ello, en cada uno de estos modelos se han realizado uno o más experimentos en los que se han probado distintas orientaciones de caída, obteniendo así un mayor abanico de caídas posibles. También se han variado en algunos modelos, elementos de su geometría que daban lugar a fallos en su funcionamiento, haciendo que la botella tocara el suelo o provocara en ella aceleraciones demasiado elevadas. También se han probado distintas presiones en cada modelo, observando de qué manera influye y comprobando que esta no provoque la plastificación en los airbags antes de que se produzca el impacto (una vez completado el impacto, no importa si el material se daña siempre y cuando consiga proteger la botella). Si se produce plastificación en los airbags, se buscan alternativas como aumentar el espesor de estos y de nuevo se comprueba cómo influyen estos cambios en el comportamiento del conjunto.

Se debe tener en cuenta los espesores de las cavidades (espacio interior en el que se introduce el aire a presión, capítulo 4.5.) de los que constan los airbags, ya que cuanto menor sean, mayor será la presión necesaria para conseguir que la botella no contacte con el suelo, lo que aumenta la rigidez del airbag, provocando mayores aceleraciones. Se trata de encontrar espesores de cavidad que consigan una rigidez óptima, ocupando el menor espacio posible, ya que uno de los propósitos de este sistema de protección es ocupar el menor espacio posible en el traslado de las botellas y disminuir los costes de transporte. Cada modelo tiene una distribución de espesores de cavidad distinta, por lo que es necesario detectar en qué lugares estos son mínimos y comprobar si consiguen que la botella no golpee en el suelo.

En este estudio se han aceptado los casos en los que la botella no golpea el suelo, aunque quede cerca de este, considerando mejores los modelos en los que la aceleración máxima que aparece en la botella durante el impacto sea la menor. Para la construcción real del modelo, es aconsejable utilizar presiones un poco mayores para asegurar la protección de la botella, ya que se trata de un cálculo aproximado como se ha explicado en apartados anteriores.

5.1. Modelo 1

Como primera opción se propone un sistema de airbags como los mencionados en el subcapítulo 2.4.2. (figura 2.17) de este informe. Consta de veinticuatro airbags, ocho longitudinales, ocho cubriendo la base y ocho en la parte superior de la botella, como se muestra en la figura 5.1. Al constar de ocho airbags de cada tipo, la porción angular de botella que cubre cada uno será de 45° ($360^\circ/8=45^\circ$). El espesor de las cavidades de los airbags aparece en la figura 4.5 del subcapítulo 4.2.

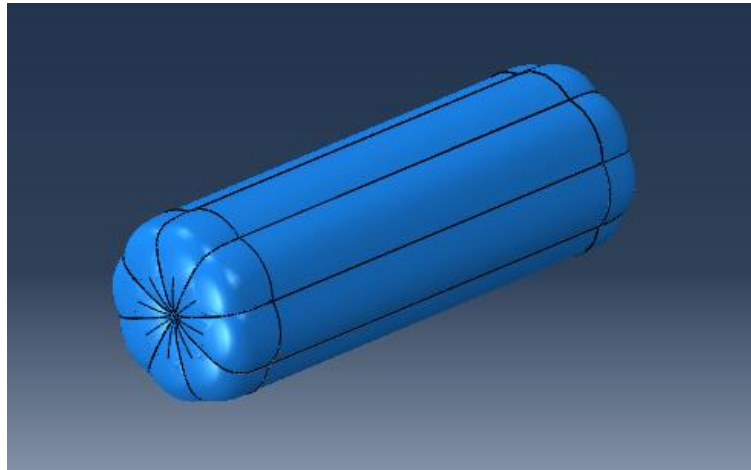


Figura 5.1: Modelo 1.

5.1.1. Experimento 1 (Modelo 1)

Este caso es el empleado en el capítulo anterior para realizar la descripción del modelo. Como ya se ha mencionado, el valor de la presión inicial introducida en los airbags es de 20KPa (es importante recordar que esta presión es manométrica) y el espesor de membrana empleado es de 1mm.

Como se mostró en la figura 4.12, esta presión resulta insuficiente y la botella entra en contacto con el suelo. Para evitar esto se han realizado distintas simulaciones en las que la botella cae en posición horizontal, aumentando en cada una dicha presión y viendo como varía la aceleración máxima, hasta conseguir que no entre en contacto con el suelo. Los valores obtenidos se presentan en la tabla 5.1.

TABLA 5.1: INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN LA ACELERACIÓN; MODELO 1 (0.1MM DE ESPESOR).

Presión (Pa)	Aceleración max. $\left(m/s^2\right)$
20000	64895.3
50000	31720.4
100000	14221.9
150000	2172.58

Con un valor de presión de 150KPa la botella deja de golpear en el suelo, pero se produce plastificación en algunas zonas de los airbags antes de que se produzca el impacto, como se puede ver en la figura 4.11 del subcapítulo 4.8.1, obteniendo un valor de tensión de Von Mises de 25.85 MPa (la tensión de plastificación del polietileno es de 25 MPa). Para evitar que esto ocurra hay dos opciones, disminuir la presión o aumentar el espesor del polietileno de los airbags (membrana). Como la presión no se puede disminuir para que la botella no contacte con el suelo, se aumenta el espesor hasta conseguir un valor para la tensión de Von Mises de 24.62 MPa con un espesor de 2 mm. Debido a este aumento en el espesor, el conjunto de airbags se vuelve más rígido, provocando un incremento en la aceleración máxima sufrida por la botella y obteniendo un valor para ésta de 3555.07 m/s^2 . Una vez se consigue alejar la tensión de los airbags de la tensión de plastificación del material, se prueba un aumento pequeño de la presión hasta que vuelva a plastificar con lo que se disminuye la aceleración máxima como se manifiesta en los valores de la tabla 5.2.

TABLA 5.2: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 1 (2MM DE ESPESOR)

Presión (Pa)	Aceleración max. (m/s^2)
160000	3579.71
180000	3515.34
200000	3338.65
230000	3113.76

De esta forma se consigue un valor de aceleración máxima de 3113.76 m/s^2 con un valor de presión de 230 KPa y un espesor de 2 mm. En la figura 5.2 se muestra la variación de la aceleración máxima con el aumento de la presión para los dos espesores estudiados.

En este primer modelo se obtiene una aceleración máxima demasiado alta, con un espesor y un valor de presión excesivos para este tipo de sistema de empaquetamiento. Además, aunque no se obtengan valores en la tensión de Von Mises mayores a la tensión de plastificación del material, se acercan demasiado a esta. Como se ha explicado en capítulos anteriores, el método de cálculo mediante elementos finitos es un método aproximado en el que hay que emplear coeficientes de seguridad sobre los resultados, que hacen aumentar los valores de esta tensión, superando en este caso la tensión de plastificación del material. Por todas estas razones, se considera este primer modelo como no válido y no es necesario realizar más experimentos con otras orientaciones de caída.

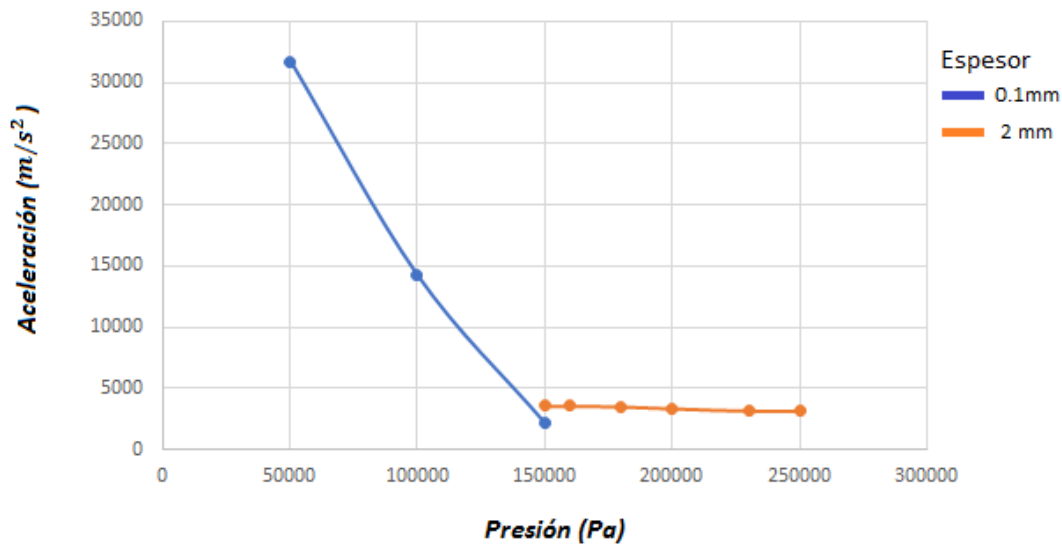


Figura 5.2: Variación de la aceleración con la presión dependiendo del espesor (Modelo 1).

No obstante, se obtienen conclusiones útiles para la construcción de los siguientes modelos:

- Cuando mayor sea la presión empleada, menos posibilidades hay de que la botella contacte con el suelo.
- Un aumento en la presión provoca un aumento de la tensión en los airbags que puede llevar a estos a plastificar.
- Con el uso de mayores espesores de membrana en los airbags, se reducen las tensiones, pero estos se vuelven más rígidos y por tanto aumenta la aceleración máxima.

5.2. Modelo 2

Ya que en el modelo 1, para conseguir que la botella no toque el suelo se necesitan presiones muy altas, se decide realizar un modelo con la misma geometría y con los mismos airbags, pero aumentando el espesor de las cavidades de estos airbags, como se muestra en la figura 5.3 (corte a un cuarto del conjunto botella-airbags). En este modelo el mínimo espesor de cavidad en los airbags que cubren la base de la botella es de 30 mm. El espesor inicial para las membranas es de 0.1 mm.



Figura 5.3: Espesor de las cavidades en el modelo 2.

5.2.1. Experimento 1 (Modelo 2)

Para comprobar la efectividad de este modelo, se realizan distintas simulaciones, en las que el conjunto impacta contra el suelo de forma horizontal y se varía la presión comprobando su influencia en la aceleración máxima que aparece. Este modelo, por su geometría, puede presentar distintos tipos de impacto, dependiendo del ángulo de rotación sobre el eje longitudinal. En este primer experimento, el impacto comienza sobre un único airbag como se muestra en la figura 5.4.

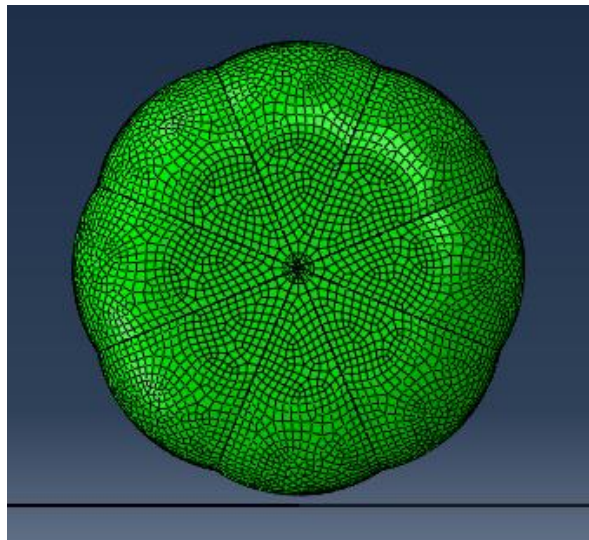


Figura 5.4: Orientación del experimento 1 (Modelo 2).

En la tabla 5.3 se presentan las aceleraciones obtenidas para cada presión introducida en los airbags. Además, estos resultados se representan en la figura 5.5 para facilitar la visualización de la variación de esta aceleración con el aumento de la presión.

TABLA 5.3: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 2
(EXPERIMENTO 1).

Presión (Pa)	Aceleración max. (m/s^2)
15000	7412.54
17000	3357.79
18000	809.547
19000	793.194
20000	786.977
22000	845.036
24000	881.879
30000	971.171

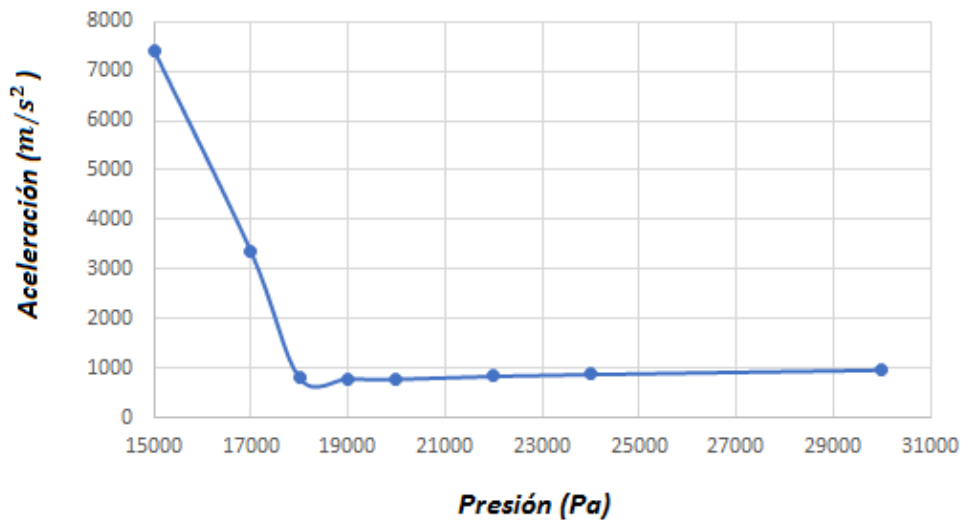


Figura 5.5: Variación de la aceleración con la presión (Modelo 2, experimento1).

Con los dos primeros valores de presión, la botella contacta con el suelo, siendo en el segundo caso con menor velocidad. Es por ello, por lo que el segundo valor de la aceleración es menor que el primero y se aproxima a los valores en los que la botella ya no entra en contacto con el suelo. Aunque la botella siga tocando el suelo, cuanto más se acerca la presión empleada a la presión óptima (la necesaria para que la botella no golpee en el suelo) más se parecen los valores de la aceleración a los obtenidos cuando la botella

ya no contacta con el suelo, pudiendo crear confusión. En caso de dudar si la botella golpea o no, esto se puede comprobar en la secuencia de desplazamientos proporcionada por un “Field output” (salida de campo), visualizando una sección del conjunto. En la figura 5.6 se hace esta comprobación para un valor de presión 17 KPa con la que la botella golpea levemente contra el suelo.

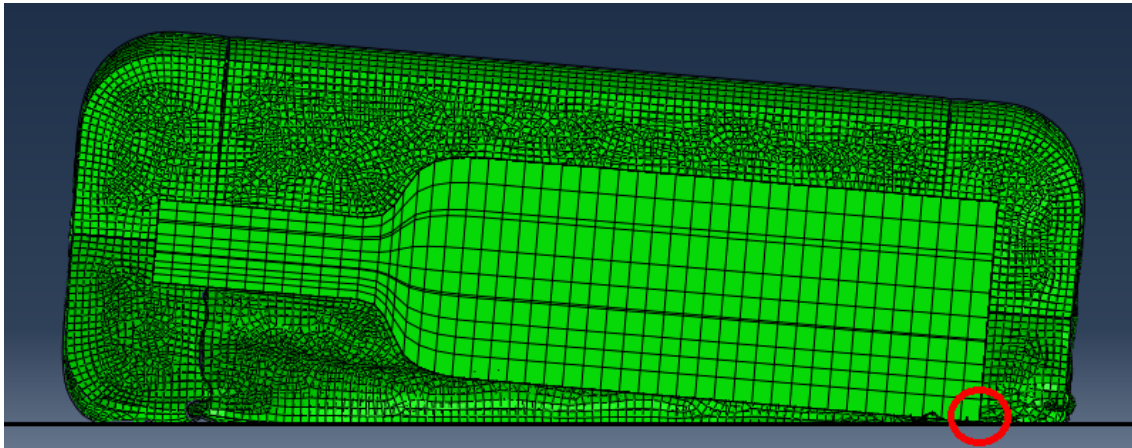


Figura 5.6: Comprobación de contacto entre botella y suelo.

A partir de un valor de presión de 18 KPa, la botella deja de contactar con el suelo, obteniéndose la menor aceleración máxima con 20 KPa, con un valor de 786.977 m/s^2 . A partir de este valor de presión, las aceleraciones máximas aumentan, ya que cada vez se consigue una rigidez mayor para el conjunto de airbags. Este aumento de rigidez asegura en mayor medida que la botella no toque el suelo, al conseguir que el espacio que queda entre la botella y el suelo durante el impacto sea mayor que cuando el conjunto es menos rígido (cuando la presión es menor). Esto se consigue a costa de la aparición de aceleraciones mayores sobre la botella. Como se concluyó a partir del modelo 1, el aumento del espesor de los airbags provoca un aumento de esta rigidez por lo que se decide realizar una simulación empleando la presión de 20 KPa y un espesor de 0.08mm (menor que el inicial que era de 0.1mm). Con este espesor se consigue disminuir la rigidez demasiado, provocando el choque de la botella con el suelo por lo que se decide realizar todos los experimentos restantes de este modelo con un espesor de membrana de 1mm, que resulta óptimo en este caso.

En todas las simulaciones las tensiones que aparecen en los airbags debidas a la presión se alejan mucho de la tensión de plastificación del material, por lo que no es necesario aplicar coeficientes de seguridad. Por ejemplo, para la presión de 20 KPa aparece una tensión de Von Mises máxima de 13.65 MPa, por lo que se podría emplear un coeficiente de seguridad de 1.8 sin que se produjese fallo, siendo el valor de este coeficiente alto con respecto a los valores usuales para este tipo de problemas.

5.2.2. Experimento 2 (Modelo 2)

Como se analizó en el subcapítulo 4.8.4, la progresión de la cantidad de área de la superficie de los airbags que entra en contacto con el suelo influye en la aceleración provocada sobre la botella. Por este motivo, se realiza un experimento en el que el impacto vuelve a ser horizontal pero el contacto inicial se produce sobre dos airbags simultáneamente (orientación de la figura 5.7).

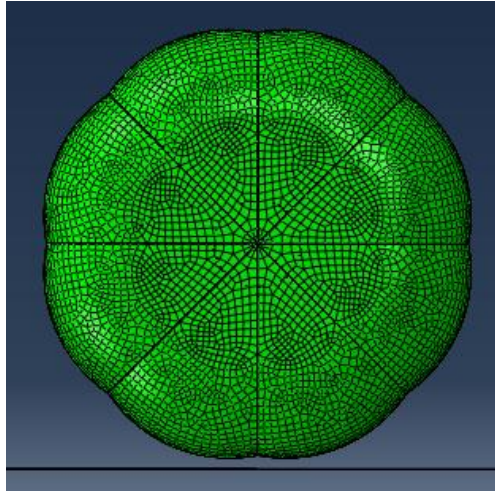


Figura 5.7: Orientación del experimento 2 (Modelo 2).

Este experimento se realiza con la presión óptima obtenida en el experimento 1 (20 KPa), obteniendo las gráficas de aceleraciones y área de contacto mostradas en la figura 5.8. Se puede observar un pico repentino en el área de contacto que provoca a su vez un pico en las aceleraciones, obteniendo en ese instante la mayor aceleración de todo el impacto, llegando a un valor de 953.056 m/s^2 . Sin considerar este pico, la aceleración máxima sería de 789.498 m/s^2 , muy similar a la del experimento 1.

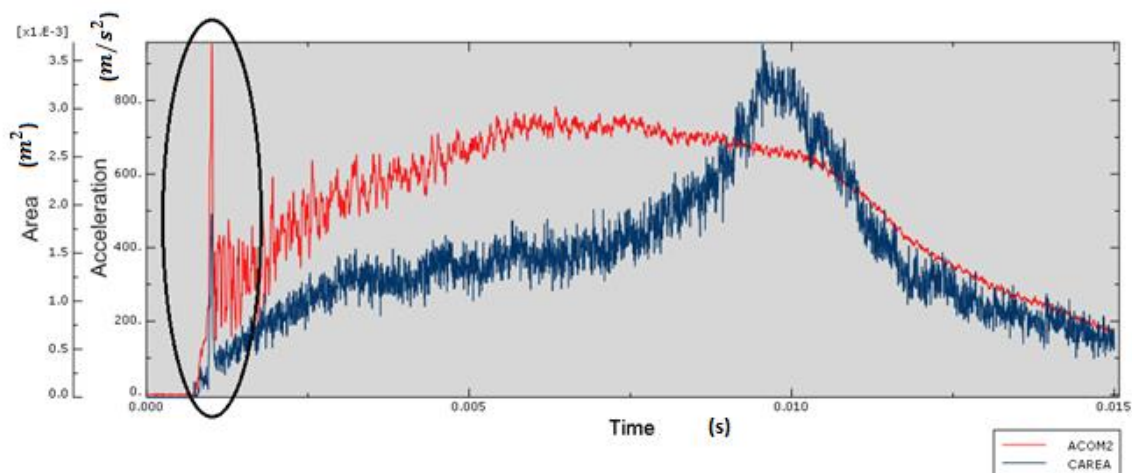


Figura 5.8: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 2 del modelo 2.

Este pico en la gráfica del área de contacto se debe a la entrada en contacto con el suelo de la unión entre los airbags longitudinales, consiguiendo un aumento de esta en un pequeño instante de tiempo. Gracias al tipo de contacto cuerpo-suelo empleado (tipo “Penalty”, sección 4.4.), se pueden observar las zonas de los airbags que entran en contacto con el suelo. En la figura 5.9 se ve como aumenta el área de contacto de forma repentina en un instante pequeño de tiempo. Se aprecia como en la figura 5.9 (a) aún no ha entrado en contacto con el suelo la unión longitudinal, mientras que en la figura 5.9 (b) si, aumentando considerablemente el área de contacto. La diferencia de tiempo entre estas dos imágenes es de 3×10^{-4} segundos. Por tanto, uno de los aspectos a mejorar en este modelo consiste en evitar esto, consiguiendo que la entrada en contacto de los airbags sea más progresiva cuando impacta con esta orientación.

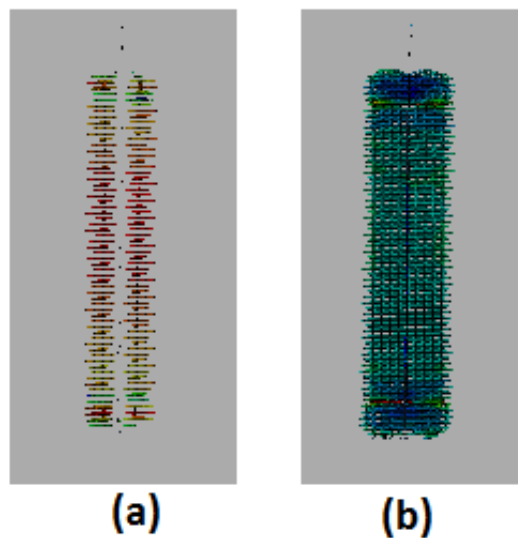


Figura 5.9: Aumento del área de contacto airbags-suelo.
(a) Para $t = 0.0008$ s. (b) Para $t = 0.0011$ s.

5.2.3. Experimento 3 (Modelo 2)

Por otro lado, uno de los parámetros a considerar a la hora de escoger orientaciones de caída críticas, es el espesor de las cavidades de los airbags, siendo en las zonas en las que este es menor, donde la botella presenta más posibilidades de contactar con el suelo. En este modelo, estas zonas son la base y la parte superior de la botella. Por ello se realizan dos pruebas en las que el conjunto impacta contra el suelo de manera vertical. Una será con la botella boca arriba y otra boca abajo. En este modelo, el espesor de la cavidad es igual en la parte superior e inferior, pero se llevan a cabo las dos pruebas para comprobar si hay diferencias aun presentando un espesor igual. En la figura 5.10 se muestran las gráficas de área de contacto y aceleraciones para la prueba en la que la botella cae boca abajo.

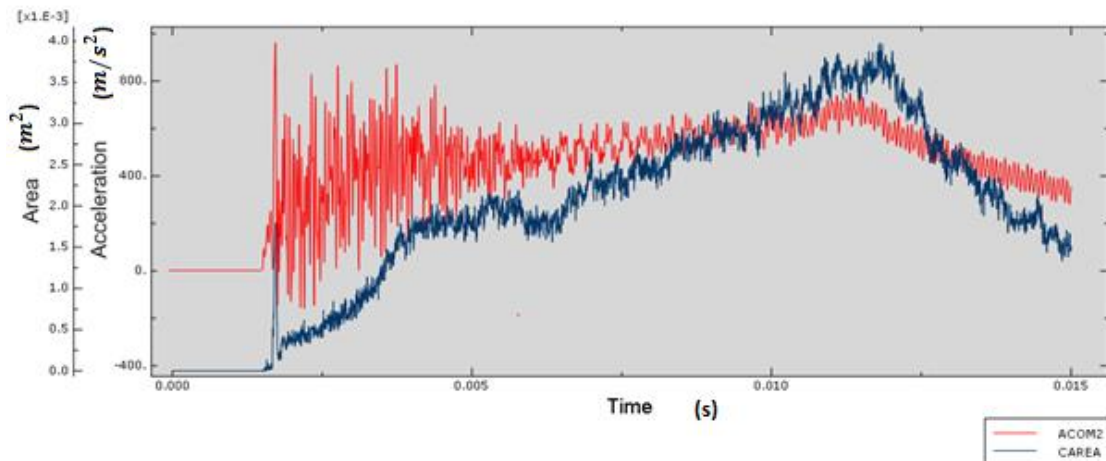


Figura 5.10: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 3 del modelo 2.

Se puede apreciar de nuevo un pico repentino del área de contacto en los instantes iniciales del impacto. Esto se debe a que los airbags superiores e inferiores tienen una geometría bastante plana como se pudo ver en la figura 5.3. Se obtiene un valor de aceleración máxima de 961.58 m/s^2 . Al realizar la segunda prueba, en la que la botella cae boca abajo se aprecia un comportamiento muy similar, apareciendo un valor de aceleración máxima de 950.112 m/s^2 . Con esto, se llega a la conclusión de que, si la botella cae con orientación vertical, no importa si es boca arriba o boca abajo, mientras la geometría y los espesores de las cavidades en los airbags superiores e inferiores sean iguales, siendo necesaria solamente la realización de una de las pruebas.

5.2.4. Experimento 4 (Modelo 2)

Por último, se detecta una orientación de caída con la que la botella podría golpear en el suelo. En el caso en el que la botella cae en diagonal, formando 45° respecto al suelo como en la figura 5.11, inicialmente solo entra en contacto con el suelo uno de los airbags, que además mantiene un espacio pequeño entre la botella y el suelo. Con esta orientación, la botella entra en contacto con el suelo haciendo que este segundo modelo tampoco sea válido.

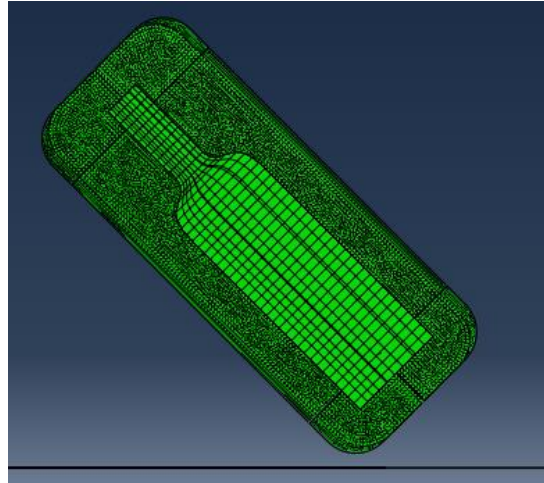


Figura 5.11: Orientación del experimento 4 (Modelo 2).

Aunque este modelo sea considerado como no valido, la disposición de los airbags longitudinales protege la botella de forma óptima, exceptuando el caso en el que impacte con la orientación empleada en el experimento dos, aunque no deja de ser aceptable. Por ello no se descarta el uso de este tipo de airbags, buscando modelos similares que consigan un aumento progresivo del área de contacto.

5.3. Modelo 3

Con la intención de conseguir que el aumento del área de contacto entre los airbags y el suelo sea lo más progresivo posible, se modifica el modelo 2, aumentando el número de airbags que cubrirán la botella. Consta por tanto de treinta y seis airbags en total, doce longitudinales, doce que cubren la parte inferior de la botella y doce que cubren la parte superior (figura 5.12). La geometría de estos tres tipos de airbags es similar a los del modelo 2, cambiando únicamente el ángulo de botella que cubre cada airbag, siendo en este caso de 30° ($360^\circ/12=30^\circ$). Los espesores de las cavidades de este modelo se mantienen iguales a los del modelo 2 (figura 5.3).

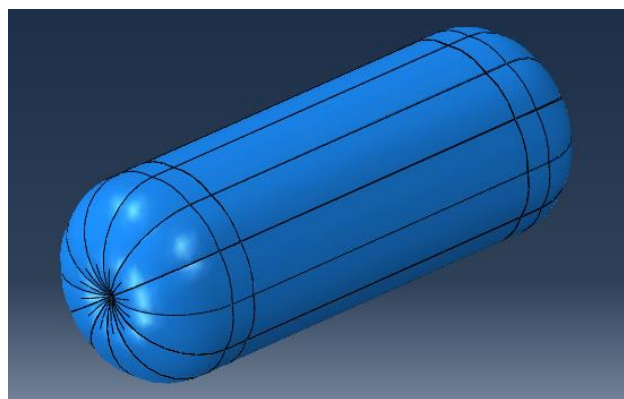


Figura 5.12: Modelo 3.

5.3.1. Experimento 1 (Modelo 3)

En primer lugar, se comprueban los cambios que provoca esta geometría con respecto a la del modelo dos, simulando la caída del conjunto con un valor de presión de 20 KPa (presión óptima para el modelo 2) con la orientación empleada en el experimento 1 de este segundo modelo (figura 5.7). Esta presión no es válida en este modelo, haciendo que la botella impacte contra el suelo. Por ello, es necesario realizar de nuevo varias pruebas variando la presión hasta conseguir la óptima. La variación de la aceleración máxima de la botella con el cambio de presión se expone con los valores de la tabla 5.4 y la gráfica de la figura 5.13 en la que se observa la convergencia con mayor claridad.

TABLA 5.4: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 3 (EXPERIMENTO 1).

Presión (Pa)	Aceleración max. (m/s^2)
20000	6987.32
25000	2944.85
30000	873.281
35000	907.806

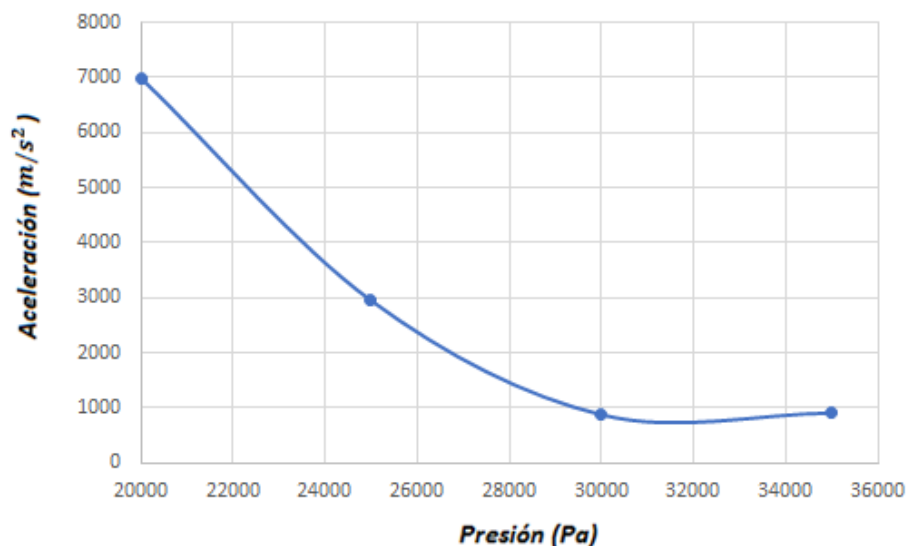


Figura 5.13: Variación de la aceleración con la presión (Modelo 3, experimento1).

Se obtiene un valor de presión óptima de 30 KPa ya que, si se sigue aumentando, el conjunto de airbags comienza a ser demasiado rígido y la aceleración máxima aumenta. La geometría de este modelo ofrece peores resultados que la del modelo 2 en la amortiguación del impacto, pero se puede igualar aumentando la presión. La tensión de Von Mises máxima que se produce sobre los airbags antes de impactar es de 14.87 MPa por lo que no hay peligro de plastificación (la tensión de plastificación del polietileno es de 25 MPa). Aun así, la aceleración obtenida con la presión óptima para este tercer modelo tiene el valor de 873.281 m/s^2 , que resulta un poco mayor que la que obtenida para el modelo 2 con la misma orientación. Este comportamiento se debe a que, al aumentar el número de airbags, sus superficies exteriores forman arcos más abiertos, lo que por otra parte ayuda a conseguir la progresión que se busca en el aumento del área de contacto consiguiendo un menor hueco entre airbags, como puede observarse en la figura 5.14, donde se comparan los arcos y huecos de los modelos 2 (a) y 3 (b).

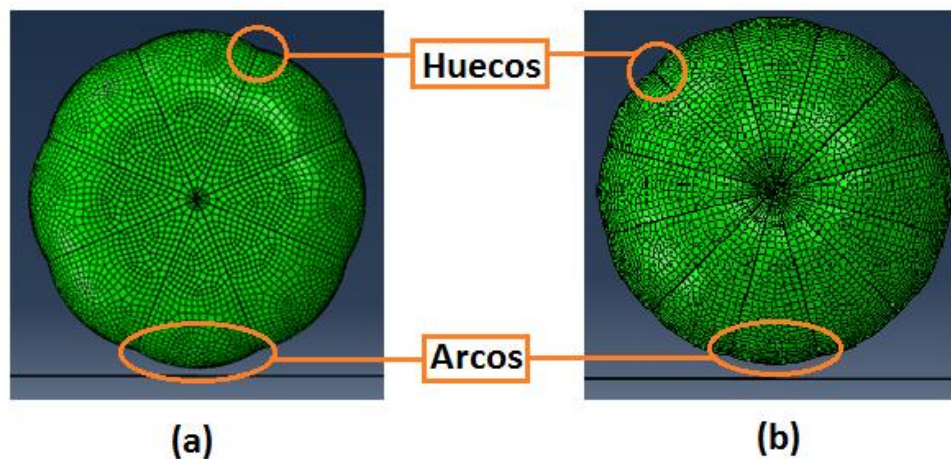


Figura 5.14: Comparación de arcos y huecos. (a) Modelo 2. (b) Modelo 3.

5.3.2. Experimento 2 (Modelo 3)

Como se compara en la figura 5.14, en este nuevo modelo, los huecos entre airbags son menores. Si el conjunto impacta con la misma orientación empleada en el experimento 2 del modelo 2 (figura 5.7), el área de contacto aumentará de forma más progresiva. Se conseguirá que la zona de unión entre airbags longitudinales no contacte de golpe y se produzca un aumento repentino de esta área como se veía en la figura 5.8. Al realizar una simulación con esta orientación y empleando la presión óptima conseguida en el experimento anterior (30 KPa), se obtienen las gráficas de aceleración y área mostradas en la figura 5.15. Se puede comprobar que el pico producido en este caso no afecta a la aceleración máxima del impacto como ocurría con el modelo 2 (figura 5.8). La aceleración máxima que aparece sobre la botella en este tercer modelo y con la orientación y las características mencionadas es de 911.043 m/s^2 . Esta es menor a la obtenida en el modelo 2 para la misma orientación (953.056 m/s^2) y además de valor similar a la conseguida en este mismo modelo con la orientación del experimento anterior (873.281 m/s^2).

Por lo tanto, con el aumento en el número de airbags e introduciendo una mayor presión en su interior, se consiguen que las aceleraciones no dependan tanto de la orientación con la que cae el cuerpo (dentro de las posibles orientaciones horizontales). Es verdad que en el experimento 1 del modelo 2 se consiguió un valor de aceleración menor a las de este modelo, pero había grandes diferencias al cambiar la orientación y es muy difícil que en la realidad el impacto se produzca justo del modo con el que lo hace en este experimento (figura 5.7). Es por esto por lo que se quiere conseguir la menor diferencia posible entre aceleraciones al modificar la orientación de caída.

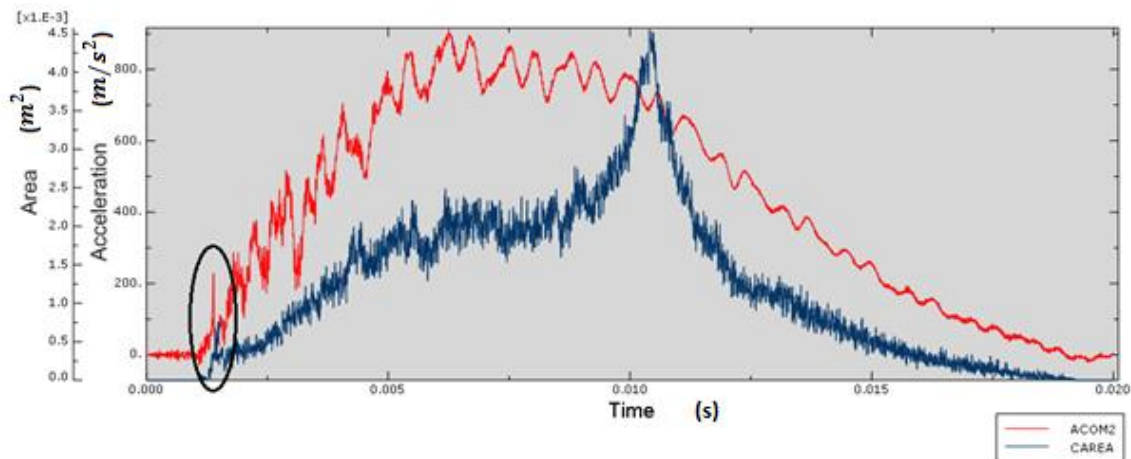


Figura 5.15: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 2 del modelo 3.

Con este modelo se ha conseguido corregir uno de los problemas que presentaba el modelo 2 (los picos de aceleración en ciertas orientaciones horizontales), pero los airbags superiores e inferiores, siguen teniendo la misma geometría exterior que los del modelo 2 por lo que presenta los mismos inconvenientes. Aparecen picos en el área de contacto, y por tanto en la aceleración, cuando se producen impactos verticales (aunque los valores de las aceleraciones máximas sean aceptables) y la botella golpea contra el suelo si el impacto es diagonal (figura 5.11). Por ello el próximo objetivo será corregir estos dos inconvenientes.

5.4. Modelo 4

En este modelo se prueba una nueva geometría, completamente diferente a la de los modelos anteriores. Se emplean airbags esféricos para conseguir la mayor progresión posible de la entrada en contacto de los airbags con el suelo. Son seis los airbags que cubren la botella y la protegen. Entre los seis forman tres esferas unidas entre sí como las de la figura 5.16, dejando un espesor de cavidad mínimo de 10.5 mm en el airbag que cubre la base de la botella.

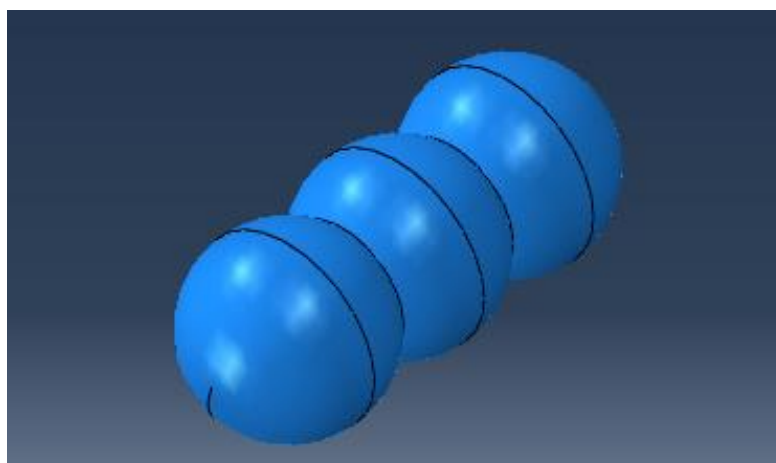


Figura 5.16: Modelo 4.

5.4.1. Experimento 1 (Modelo 4)

En primer lugar, se prueba su funcionamiento mediante caídas horizontales. En este caso, debido a su geometría, no influye el ángulo de rotación sobre el eje longitudinal con el que caiga. Como en los modelos anteriores, se prueban distintas presiones hasta conseguir la óptima, con la que la aceleración máxima producida en la botella sea la menor. Los resultados de las distintas pruebas se encuentran en la tabla 5.5.

TABLA 5.5: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 4 (EXPERIMENTO 1).

Presión (Pa)	Aceleración max. (m/s^2)
10000	19469.5
50000	13842.3
70000	12903.6
100000	836.015

Al alcanzar un valor de presión de 100 KPa, la botella deja de entrar en contacto con el suelo obteniendo un valor de aceleración de $836.015 m/s^2$. Al aplicar esta presión se producen en los airbags tensiones de 25.63 MPa, lo que provoca que su material plastifique sin necesidad de aplicar coeficientes de seguridad. Por ello no merece la pena comprobar si la aceleración continúa disminuyendo con el aumento de presión.

Para evitar esta plastificación, se aumenta el espesor de membrana del airbag, que en las pruebas anteriores era de 0.1mm, hasta alcanzar una tensión de Von Mises máxima de

20.82 MPa con un espesor de 0.5 mm. Esta tensión no provoca plastificación aun aplicando un coeficiente de 1.2, aceptable para este estudio. La aceleración máxima obtenida con este espesor es de 1402.26 m/s^2 . Se aprecia un aumento considerable de la aceleración, debido a la mayor rigidez del conjunto de airbags, provocada por este aumento en el espesor. Una vez se consigue evitar la plastificación, se aumenta de nuevo la presión para ver su influencia en las aceleraciones máximas, teniendo en cuenta además las tensiones que aparecen, obteniendo los resultados de la tabla 5.6.

TABLA 5.6: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 4
(EXPERIMENTO 1) CON UN ESPESOR DE 0.5MM.

Presión (Pa)	Aceleración max. $\left(\text{m/s}^2\right)$	Tensión de Von Mises (MPa)
100000	1402.26	20.82
110000	1372.34	21.9
120000	1252.22	23.49
130000	1327.87	25

Como se intuía, las aceleraciones disminuyen con el aumento de la presión, hasta alcanzar un punto en el que el conjunto de airbags comienza a ser excesivamente rígido y estas aumentan. De todas formas, las tensiones también aumentan acercándose a la tensión de plastificación lo que lleva al fallo material, con lo cual la presión considerada como óptima para este modelo será de 100 KPa. Podría optarse por aumentar aún más el espesor de membrana, pudiendo así aumentar la presión, pero un espesor de 0.5mm y un valor de presión de 100 KPa ya se consideran valores altos para este tipo de sistemas de empaquetamiento. Si se analiza la gráfica de CAREA (área total en contacto entre el conjunto de airbags y el suelo), se puede ver como este tipo de geometría consigue que la superficie que entra en contacto con el suelo sea completamente progresiva, sin presentar picos en ningún momento, como se refleja en la figura 5.17. En este experimento, la zona de unión entre airbags no alcanza el suelo. Esta sería la única situación en la que podrían aparecer picos de área, los cuales no serían provocados por la geometría esférica de los airbags sino por su unión.

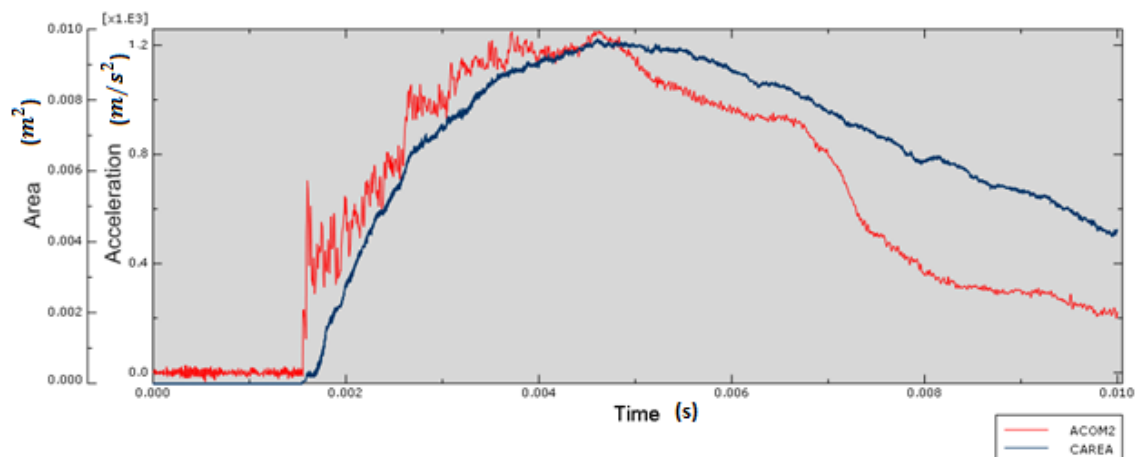


Figura 5.17: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 1 del modelo 4.

Se observa un pico en la aceleración nada más comenzar el impacto, facilitando que posteriormente se alcancen grandes aceleraciones. Esto se debe a que, en el inicio del impacto, es una gran cantidad de área la que entra en contacto. Esto no ocurría en los modelos anteriores en los que en contacto inicial era de uno o dos airbags más pequeños. Es por esto por lo que la curva del área tiene gran pendiente. Una curva ideal en la gráfica del área sería como la obtenida en este experimento (figura 5.17), pero con una pendiente menor.

5.4.2. Experimento 2 (Modelo 4)

En este experimento se analiza el comportamiento del modelo 4 cuando impacta contra el suelo de forma vertical. Los airbags superior e inferior son iguales, por lo que como se vio en el subcapítulo 5.2.3 no importa cuál de ellos sea el que impacte, es decir, los resultados serán similares tanto si la botella cae boca arriba como boca abajo. Al realizar la simulación se comprueba que la botella golpea en el suelo provocando por tanto su rotura. Como se ha señalado en el experimento anterior, un valor de presión de 100 KPa es demasiado alto para este tipo de sistemas de empaquetamiento, con lo cual resulta innecesario realizar más pruebas y el modelo se considera como no válido. No obstante, ha servido para comprobar que la geometría esférica resulta ideal para conseguir esa progresión de superficie de airbag que entra en contacto con el suelo que buscamos.

5.5. Modelo 5

Después de estudiar el modelo 4, se llega a la conclusión de que la disposición de sus airbags hacen que el conjunto de estos sea insuficientemente rígido, necesitando aumentar la presión considerablemente para acrecentar así dicha rigidez. Una idea para aumentar

esta rigidez sin necesidad de emplear presiones mayores es utilizar un mayor número de airbags para cubrir la misma zona de la botella. Es decir, manteniendo la geometría de los seis airbags del modelo 4, dividir cada uno de estos en ocho airbags independientes. De este modo la progresión del área de contacto será como la del modelo 4 (figura 5.17). Hasta ahora lo que más problemas ha dado en la protección de la botella ha sido la protección de los extremos superior e inferior de la botella. Por este motivo y con la intención de ahorrar tiempo computacional y de diseño, en este modelo únicamente se diseña la disposición de airbags en la base de la botella (figura 5.18). Otra variación de este modelo con respecto al anterior es el aumento en los espesores de la cavidad de los airbags, ya que en el modelo anterior resultaba insuficiente. Para este modelo el menor espesor de cavidad, y por tanto el más desfavorable, tiene un valor de 33.43 mm. Este influirá cuando la botella caiga de manera diagonal, siendo esta en un principio, la orientación de caída crítica.

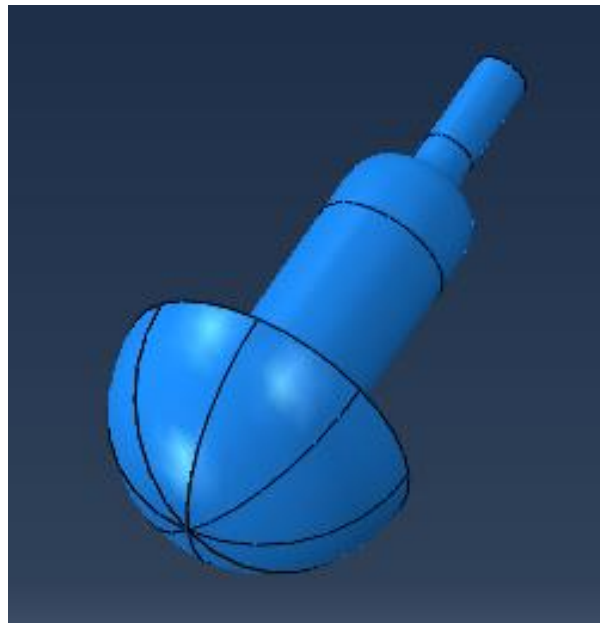


Figura 5.18: Modelo 5.

5.5.1. Experimento 1 (Modelo 5)

En primer lugar, se analiza la caída vertical variando su presión y comparando las aceleraciones máximas obtenidas, con la intención de conseguir la presión óptima para este modelo, la cual hace que esta aceleración sea mínima. Así se encuentran los resultados de la tabla 5.7 en los que se ve como a partir de 7 KPa la botella no entra en contacto con el suelo, obteniendo un valor de aceleración máxima de 307.55 m/s^2 . A partir de esta presión el conjunto de airbags se vuelve cada vez más rígido, provocando un aumento de las aceleraciones máximas del impacto. Con un valor de presión de 10 KPa se consigue un valor de aceleración máxima muy similar a la que aparece con 7 KPa, pero inicialmente se escoge como presión optima la menor, la cual tiene un valor mucho más bajo al necesitado en los modelos anteriores. El contacto con el suelo no es tan

progresivo como en el modelo 4 (figura 5.17) pero los picos que presenta en la gráfica del área de contacto se pueden considerar irrelevantes. Con la división de uno de los airbags del modelo 4 en varios airbags independientes se consigue una gran disminución en la aceleración máxima sufrida por la botella, empleando un valor de presión menor. Esta disminución también se debe al aumento en el espesor de las cavidades de estos airbags.

TABLA 5.7: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 4 (EXPERIMENTO 1).

Presión (Pa)	Aceleración max. (m/s^2)
5000	15023.67
7000	307.547
10000	310.004
15000	529.318
20000	819.238

5.5.2. Experimento 2 (Modelo 5)

Como la orientación crítica, con la cual podría golpear la botella en el suelo, es la diagonal, conviene comprobar que esta no golpee. Con la presión escogida en el experimento anterior y una orientación de caída diagonal de 45° con respecto al suelo la botella entra en contacto con el suelo, por lo que esta pasa de ser optima a inválida. Es por ello por lo que se aumenta la presión hasta conseguir que la botella deje de tocar el suelo con un valor de presión de 20 KPa, con la que se obtiene un valor de aceleración máxima de $819.24 m/s^2$. Con esta presión aparece una tensión máxima en las membranas de los airbags con un valor de 26.93 MPa. Esta tensión produce plastificación en los airbags, lo que marcaría este modelo como no válido. Si se presta atención al campo de tensiones que proporciona el “Field output” (salida de campo) obtenido en la simulación, se puede ver como las tensiones altas aparecen en la zona de unión de los airbags de este modelo con los demás airbags que cubrirían la botella (figura 5.19), mientras que en el resto de zonas los valores de la tensión no provocan la plastificación del material. Por tanto, en un principio, se considera válido este modelo, con la intención de comprobar posteriormente que no aparecen tensiones mayores a la de plastificación una vez se acoplen el resto de airbags.

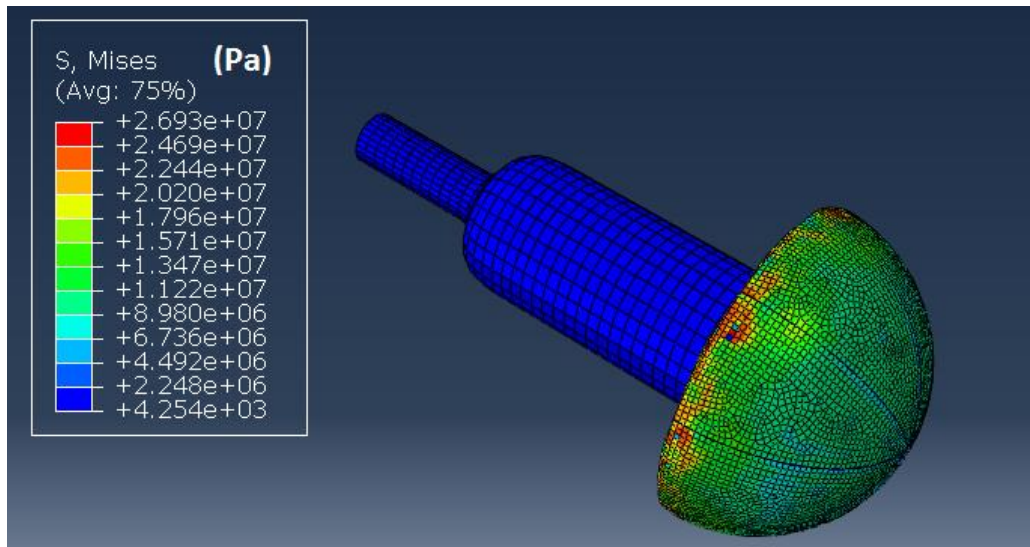


Figura 5.19: Campo de tensiones en el Modelo 5 (20 KPa).

Se consigue así un modelo adecuado para la protección de las zonas superior e inferior de la botella. Ahora el objetivo es conseguir acoplar estos airbags a los airbags longitudinales de los primeros modelos.

5.6. Modelo 6

Al obtener buenos comportamientos en el estudio del modelo 5, en este se busca la forma incluir airbags parecidos a los de este modelo en las partes superior e inferior del modelo 3. Al igual que en el modelo 3, se podrían incluir en el modelo 2, ya que presentan geometrías muy similares, variando solamente el número de airbags. El conjunto de los airbags longitudinales del modelo 3 hacen que la superficie de unión entre estos y los airbags de los extremos no sea circunferencial. Por ello, es necesario realizar algunos cambios en los airbags del modelo 5 para que se puedan unir.

Se proponen ocho airbags que se ajustan perfectamente a los airbags longitudinales (figura 5.20 (b)). No es posible formar una geometría como la del modelo 5 con la unión de estos ocho airbags, pero se busca que sea lo más esférica posible.

De nuevo se realizan los experimentos de este modelo con la única parte que interesa estudiar, el conjunto que cubre la base de la botella. La forma y disposición de este modelo se ilustra en la figura 5.20. El espesor de membrana utilizado en su airbag es de 0.1mm.

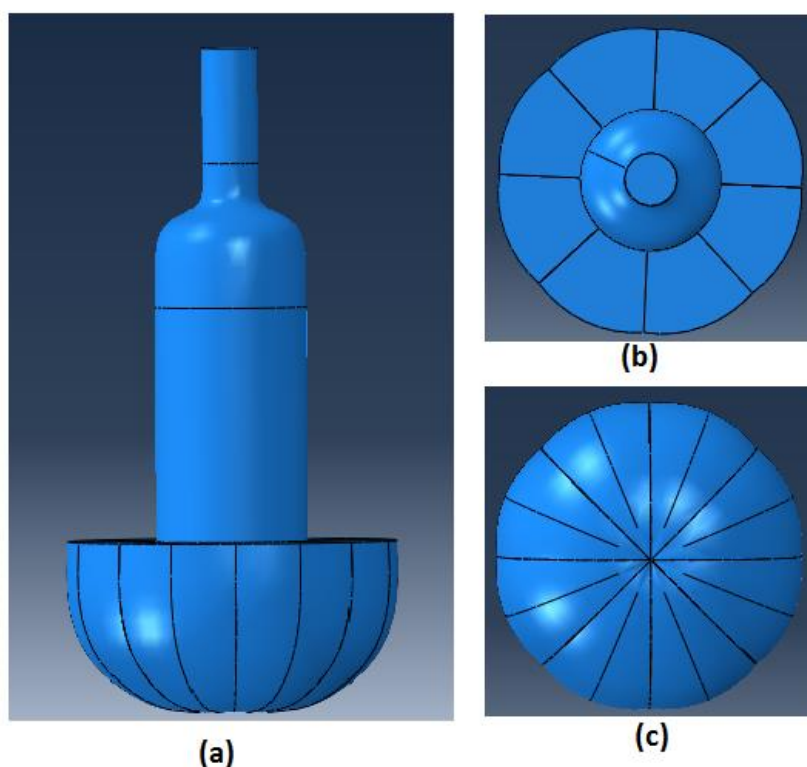


Figura 5.20: Modelo 6. (a) Perfil. (b) Planta 1. (c) Planta 2.

5.6.1. Experimento 1 (Modelo 6)

Para analizar su funcionamiento se realiza en primer lugar una simulación de caída con orientación vertical. Esta forma de caer no es la más crítica, al no ser la que deja menos espacio entre la botella y el suelo al comenzar el impacto, pero se puede apreciar en la figura 5.20 (a) como la superficie que impacta inicialmente tiende a ser plana, lo cual puede provocar picos en la aceleración. Se emplea la presión óptima del modelo 3 (30 KPa), ya que la intención de este modelo es substituir los airbags superiores e inferiores de este modelo. Tras realizar dicha simulación se obtienen las gráficas de la figura 5.21 que corroboran la idea inicial de que se producirían picos en el área de contacto y por tanto también en la aceleración.

En la figura 5.21 se puede apreciar como aparecen aceleraciones (línea roja) bastante grandes antes de que se produzca el impacto. Esto puede deberse a que, como no están acoplados los demás airbags, la aceleración irreal que aparece por el inflado inicial de los airbags (desarrollado al final de la sección 4.8.2.) es mayor. Estas aceleraciones serán menores en el momento en el que la botella esté cubierta completamente por todos los airbags. No obstante, como estas aceleraciones no influyen en la aceleración máxima provocada por el impacto, se pueden ignorar en la interpretación de resultados. Se obtiene un valor de aceleración máxima de 1095.73 m/s^2 . Resulta alta comparada con los valores conseguidos en otros modelos, pero se debe a la orientación con la que se produce el impacto. En el momento en el que esta orientación varié un poco, el primer contacto del

impacto no será tan plano y los picos de aceleraciones serán menores. Como las posibilidades de que el conjunto impacte justo con esta orientación son pequeñas, por el momento se puede considerar este modelo como aceptable.

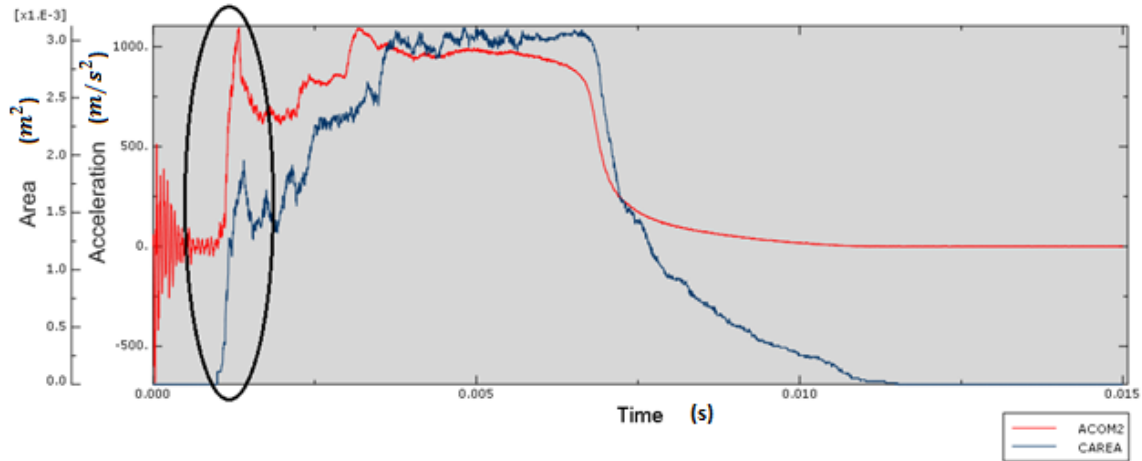


Figura 5.21: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 1 del modelo 6.

5.6.2. Experimento 2 (Modelo 6)

Como la orientación de caída diagonal es con la que el espacio entre la botella y el suelo al comenzar el impacto es la menor, se realiza también una simulación con dicha orientación para comprobar que la botella no contacte con el suelo. Se emplea la misma presión que en el experimento anterior (30 KPa), obteniendo los resultados de la figura 5.22.

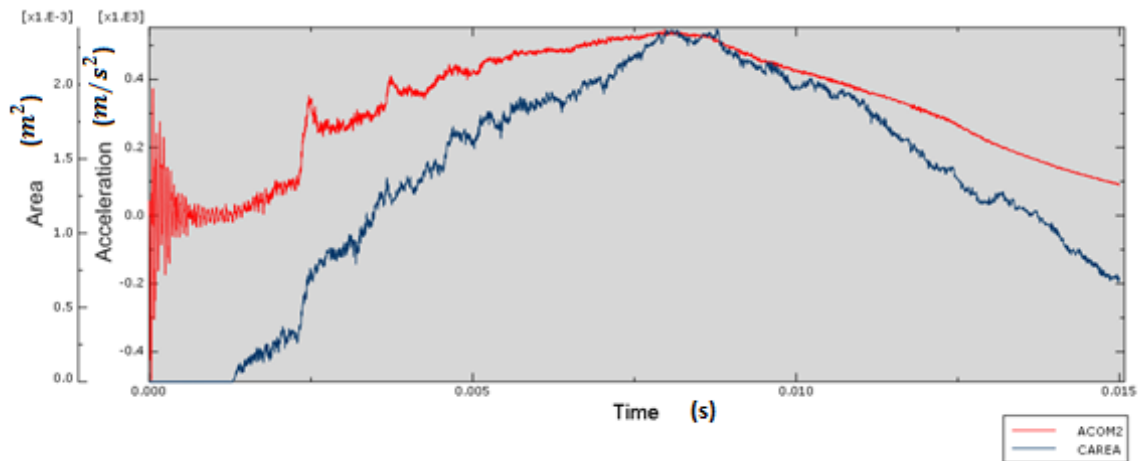


Figura 5.22: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 2 del modelo 6.

Se prueba que la botella no toca el suelo y además de demuestra que mientras la orientación de caída no sea exactamente la estudiada en el experimento 2 de este mismo

modelo, el aumento del área de superficie que entra en contacto con el suelo se produce de forma progresiva, obteniendo aceleraciones mucho menores. En este caso, en el que la botella cae con una orientación diagonal de 45° con respecto al suelo, aparece un valor de aceleración máxima de 520.19 m/s^2 .

5.7. Modelo 7

Una vez pulidos los fallos que presentaban los primeros modelos, se prueban nuevos casos con el objetivo de mejorar la protección de la botella y encontrar más conclusiones sobre el comportamiento de este tipo de sistemas, los cuales enriquezcan el estudio.

Este séptimo modelo es un poco diferente a los anteriores, cubriendo la zona de la botella que cubrían los airbags longitudinales por otros con forma de aro. De aquí en adelante se denominarán estos airbags como airbags tipo “aro”. Al igual que los longitudinales, los bordes exteriores tienen forma de arco. De las conclusiones obtenidas con el estudio de los modelos realizados hasta ahora, se sabe que los arcos cerrados consiguen amortiguar el golpe con mayor facilidad, pero cuentan con el problema de producir picos repentinos en el área total de contacto airbags-suelo, provocando así un aumento de las aceleraciones. En este modelo se emplean once airbags de tipo “aro”, con 20mm de ancho, dejando un espesor mínimo de cavidad de 55 mm en la zona más ancha de la botella. En la figura 5.20 se encuentra la sección de este airbag en la zona más ancha de la botella, acotada en metros (Abaqus® no usa unidades, por lo que, si introducimos todos los datos en unidades del sistema internacional, los resultados también estarán en este sistema). Además, este modelo consta también de dieciséis airbags como los del modelo 5 (formando entre todos, una semiesfera), ocho para proteger la base de la botella y los otros ocho para la zona de la boca. Estos dos tipos de airbags se pueden unir sin problema, ya que la superficie de unión de los aros es circunferencial al igual que la que forman el conjunto de airbags del modelo 5. De este modo queda un conjunto de airbags como el que se ve en la figura 5.24. El espesor de membrana utilizado en cada uno de estos airbags es de 0.1mm.

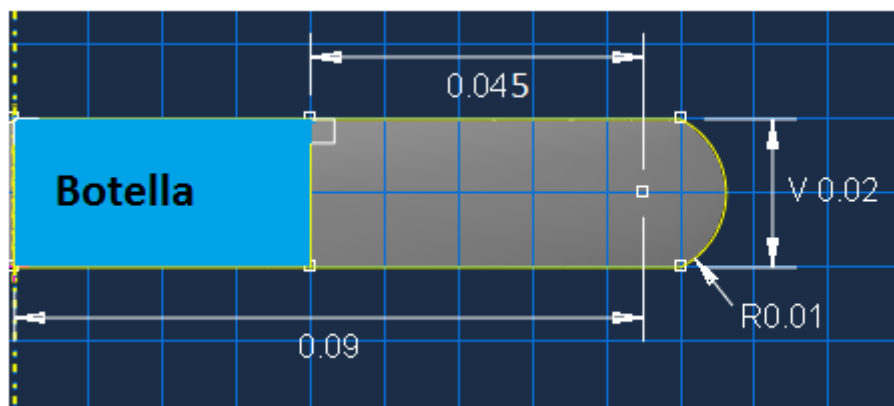


Figura 5.23: Sección airbag tipo “aro” modelo 7 (m).

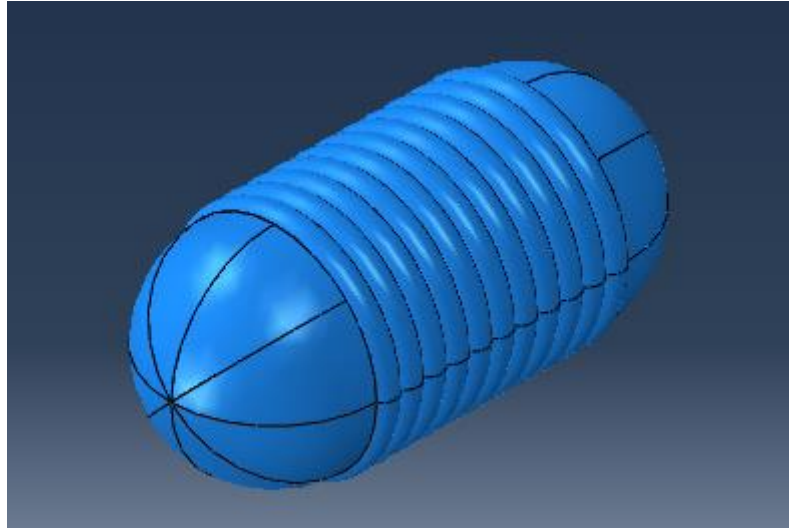


Figura 5.24: Modelo 7.

5.7.1. Experimento 1 (Modelo 7)

Como el comportamiento los airbags superiores e inferiores están estudiados en el subcapítulo 5.5, para este modelo solo es necesario analizar el comportamiento de los airbags tipo “aro”. Como el objetivo principal es obtener conclusiones del comportamiento de los airbags de este tipo”, no interesa destinar tiempo computacional en obtener las aceleraciones máximas producidas en impactos verticales. Para estudiarlos se realizan pruebas en las que la botella cae de forma horizontal, introduciendo distintas presiones en los airbags y viendo cómo varía la aceleración máxima que aparece sobre la botella. Debido a la simetría del modelo, la variación del ángulo de rotación sobre el eje longitudinal no influye. Los resultados de las distintas pruebas se muestran en la tabla 5.8.

TABLA 5.8: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 7
(EXPERIMENTO 1).

Presión (Pa)	Aceleración max. (m/s^2)
5000	1533.42
10000	1341
15000	1342.44
20000	1388.79
25000	1448.75

Con la primera presión de 5 KPa la botella golpea en el suelo, pero a partir de 10 KPa deja de golpear, obteniendo un valor de aceleración de 1341 m/s^2 . Con un valor de presión de 15 KPa se tiene un valor de aceleración máxima similar a la de la presión de 10 KPa, pero a partir de esta, la aceleración aumenta bruscamente al elevar la presión de los airbags. Estas variaciones se visualizan con mayor facilidad al representarlas en una gráfica como la de la figura 5.25.

Se escoge como presión óptima para este modelo un valor de presión de 10 KPa. En el análisis del modelo 5, se vio que con un valor de presión de 10 KPa, la botella golpea el suelo si impacta con orientación diagonal, pero como ya se ha expuesto, en este experimento únicamente se estudia el comportamiento de los airbags tipo “aro”. No obstante, una vez finalizado el análisis de este tipo de airbags, se comprobará el comportamiento del conjunto en caída diagonal.

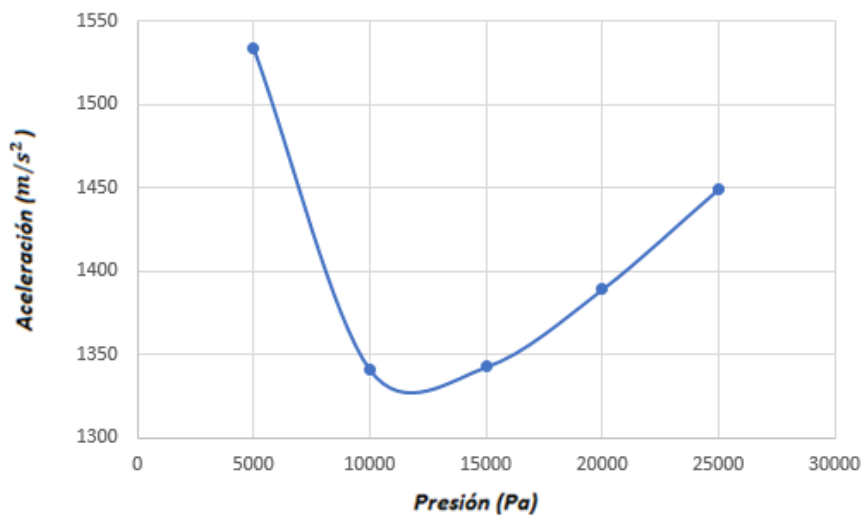


Figura 5.25: Variación de la aceleración con la presión dependiendo del espesor (Modelo 7, experimento 1).

Por otra parte, si se examinan las gráficas de ACOM2 (aceleración equivalente de la botella en el eje “y”) y CAREA (área total de la superficie de los airbags en contacto con el suelo), se puede ver como ocurre el mismo problema que en el modelo 2 (subcapítulo 5.2.2) con la unión entre los airbags. Al entrar en contacto estas uniones con el suelo, se producen picos repentinos en la cantidad de área de contacto, que en este caso no provocan la aceleración máxima del impacto como ocurría en el experimento 2 del modelo 2, pero hacen que la aceleración aumente, provocando posteriormente un valor de aceleración máxima mayor, como se puede apreciar en la figura 5.26.

Comprobando el campo de tensiones del conjunto antes de impactar, se puede ver que la tensión máxima tiene un valor de 18.96 MPa, considerada aceptable con un coeficiente de seguridad de 1.3

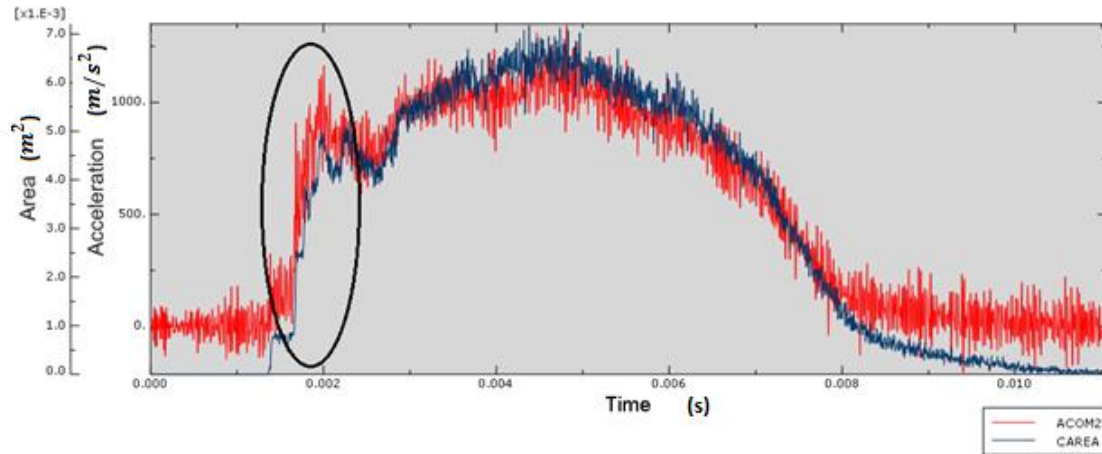


Figura 5.26: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 1 del modelo 7.

5.7.2. Experimento 2 (Modelo 7)

Por último, se comprueba el campo de tensiones del conjunto con 20 KPa, únicamente para comprobar si la hipótesis que se hizo en el subcapítulo 5.5.2, en la cual se decía que las tensiones disminuirían cuando todos los airbags estuviesen acoplados, es correcta. En la figura 5.27 se muestra el campo de tensiones del conjunto cortando, donde se puede ver como la tensión máxima es menor a la encontrada en el modelo 5 y no se encuentran en las mismas zonas (subcapítulo 5.5.2, figura 5.16).

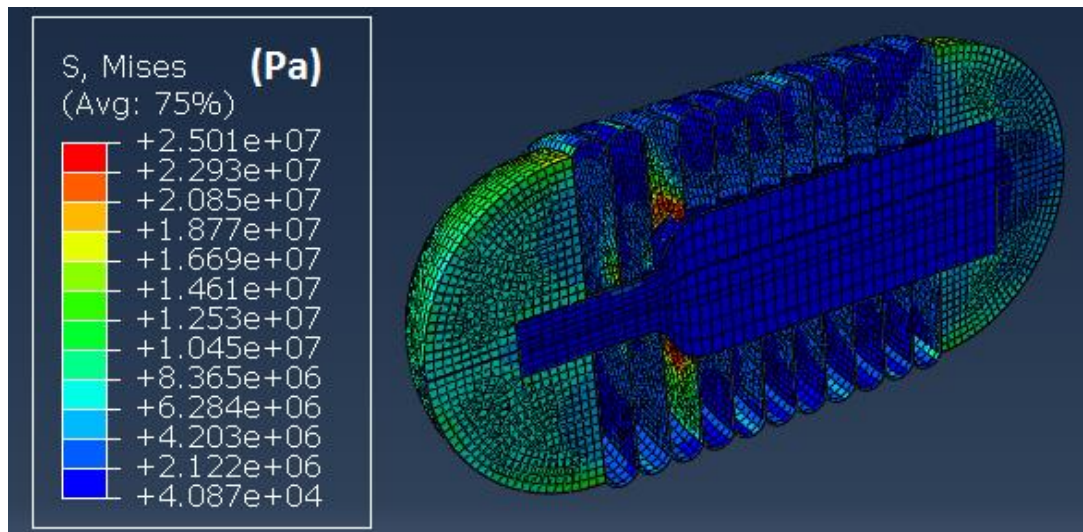


Figura 5.27: Campo de tensiones en el Modelo 7 (10 KPa).

Con un valor de presión de 20 KPa se produce plastificación material, ya que la tensión de Von Mises máxima es de 25.01 MPa. Esto no importa porque la presión óptima para este modelo es de 10 KPa y con ella no se produce plastificación. Este experimento se ha realizado simplemente para comprobar que los resultados de los modelos en los que solo se colocan algunos airbags del conjunto total no son fiables. Este tipo de modelos únicamente son útiles para tener una idea del comportamiento de la geometría empleada.

5.8. Modelo 8

Durante todas las pruebas realizadas, el objetivo principal es disminuir la aceleración máxima que sufre la botella, ya que esta aceleración está directamente relacionada con la capacidad de protección que el conjunto de airbags proporciona a la botella.

Como en el modelo anterior, la aceleración aumentaba debido a los picos producidos por la entrada en contacto con el suelo de las uniones entre airbags, en este nuevo modelo se intenta corregir este comportamiento. Para ello se cambia la geometría exterior de los airbags de tipo “aro”, haciendo que el arco exterior sea más abierto. En el modelo 3 se vio cómo arcos más abiertos corrigen en cierta medida los picos de área provocados por las uniones, ya que dejan huecos menores en la unión entre airbags, pero son menos efectivos a la hora de amortiguar el inicio del impacto. Para conseguir este arco más abierto, no se cambia el radio empleado en el modelo 7 de 10 mm, sino que su centro se sitúa a 40 mm de la superficie de la botella en la parte más ancha de esta, en vez de situarse a 45 mm. De esta forma, el espacio inicial entre la superficie de la botella y el suelo, en línea perpendicular a esta, es de 50 mm mientras que en el modelo 7 era de 55 mm. En la figura 5.28 se comparan los arcos y huecos que presentan las geometrías de los modelos 7 (a) y 8 (b). El espesor de membrana en este modelo es igual al utilizado en el modelo 7 (0.1 mm).

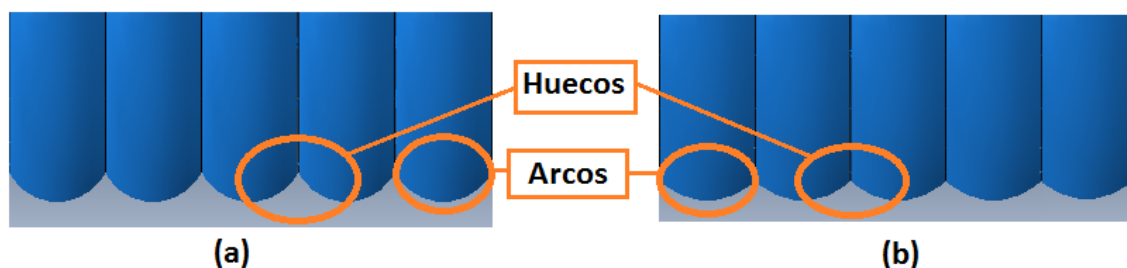


Figura 5.28: Comparación de arcos y huecos. (a) Modelo 7. (b) Modelo 8.

5.8.1. Experimento 1 (Modelo 8)

En primer lugar, se compara el comportamiento de este modelo, con orientación de caída horizontal, con el del experimento 1 del modelo 7, comprobando si los arcos abiertos corrigen los picos en la gráfica de área de contacto (CAREA). Para ello se emplea la misma presión y espesor de membrana de los airbags que en el modelo 7 (10 KPa). En la

figura 5.29 se presentan las gráficas obtenidas en este experimento. Los picos continúan apareciendo ya que, aunque menores, los huecos entre uniones siguen existiendo. De todos modos, fijándose en los valores de la aceleración, se puede observar como se ha conseguido disminuir la aceleración máxima, que ahora tiene un valor de 1194.96 m/s^2 . Aunque esta es menor que la conseguida en el modelo 7 (1341 m/s^2), no existen grandes diferencias. Se puede decir que el empleo de arcos más abiertos mejora la protección de la botella, pero no se trata una técnica muy eficaz para este caso.

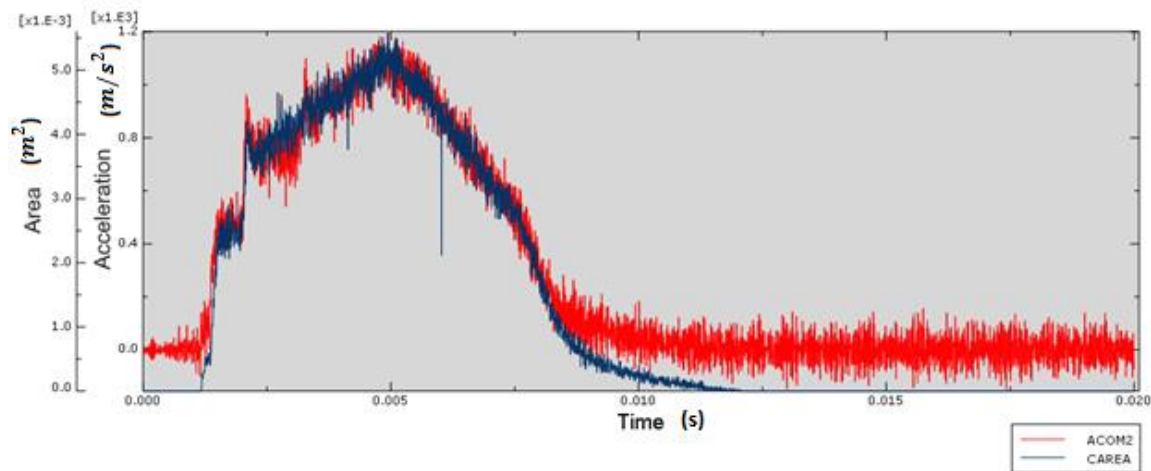


Figura 5.29: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 1 del modelo 8.

5.8.2. Experimento 2 (Modelo 8)

Con un valor de presión de 10 KPa (óptima para los airbags tipo “aro” de este modelo), los airbags que cubren la base de la botella no funcionan correctamente en caídas diagonales según el análisis del modelo 5. El estudio realizado en dicho modelo se realizó principalmente para ver como se comportaba su geometría a la hora de entrar en contacto con el suelo, pero las aceleraciones pueden variar. Al igual que pasaba con las tensiones, los valores de las aceleraciones pueden variar una vez se acoplen todos los airbags que forman el conjunto. Por ello resulta interesante analizar el comportamiento de este modelo, en el que se encuentran todos los airbags, cuando impacta con orientación diagonal, formando 45° con el suelo. Se comprueba que la botella no entra en contacto con el suelo en este caso, apareciendo un valor de aceleración máxima de 629.96 m/s^2 . Con este último ensayo, se puede afirmar que este modelo, aunque con aceleraciones máximas mayores a las del modelo 3, protege correctamente la botella para cualquier orientación con la que esta impacte contra el suelo.

Después de realizar este experimento, se comprueba que los modelos en los que solo se incluyen algunos de los airbags, son útiles para saber cómo aumenta el área de contacto entre el conjunto y el suelo, pero los valores de las aceleraciones no son reales, variando considerablemente una vez que se incluye el resto de airbags.

5.9. Modelo 9

Una de las conclusiones a las que se llega en el modelo anterior es que con el aumento de la apertura de los arcos que forma la geometría exterior de los airbags tipo “aro”, se consigue disminuir los picos en la gráfica del área total en contacto, los cuales provocan picos similares en la gráfica de aceleración. En todo momento se busca la disminución de la aceleración máxima sufrida por la botella, por lo que se busca disminuir estos picos lo máximo posible, como se explicaba en modelos anteriores. Por tanto, se prueba un modelo en el que estos arcos se encuentran lo más abiertos posible. Este es el caso en el que, en vez de un arco, los airbags forman una línea recta en la parte de su sección que contacta con el suelo, haciendo desaparecer los huecos entre uniones, que eran los causantes del problema de los picos. Al prescindir del arco en la sección de estos airbags, el espacio que queda entre la botella y el suelo en línea perpendicular a esta es de 50 mm. Los airbags que cubren la base y la parte superior de la botella serán idénticos a los de los modelos 7 y 8. El espesor de membrana se mantiene igual al de los últimos modelos (0.1 mm). En la figura 5.30 se muestra cómo queda la disposición final de este modelo.

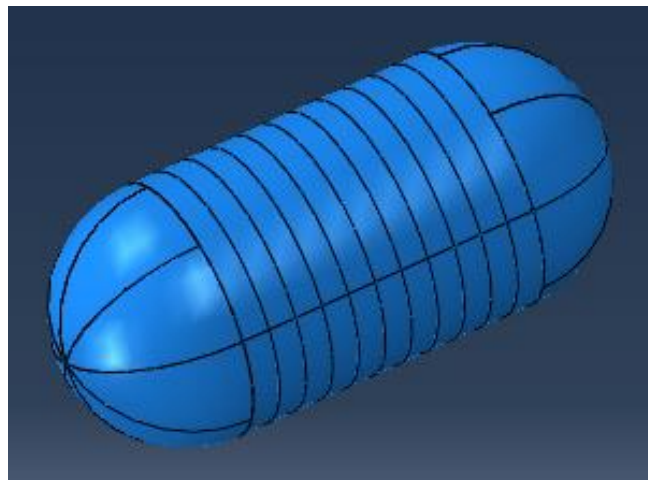


Figura 5.30: Modelo 9.

5.9.1. Experimento 1 (Modelo 9)

Como este modelo se construye para comprobar el comportamiento de los airbags tipo “aro”, cuando no presentan geometrías exteriores con forma de arco, es suficiente con la realización de un único experimento en el que el conjunto impacte con una orientación horizontal.

Inicialmente se prueba con un valor de presión interior de 10 KPa, que es la óptima para los dos modelos anteriores, pero se produce contacto entre la botella y el suelo. Para evitar esto, se realizan simulaciones aumentando esta presión hasta conseguir que se deje de producir dicho contacto, con un valor de presión de 25 KPa. Como se puede comprobar, estos airbags amortiguan peor el golpe cuanto más abiertos son los arcos de su superficie exterior (en este caso están tan abiertos que dejan de ser arcos y pasan a formar una línea

recta). Para obtener más conclusiones, se analiza su comportamiento mediante las gráficas de aceleración y área total de contacto, presentadas en la figura 5.31.

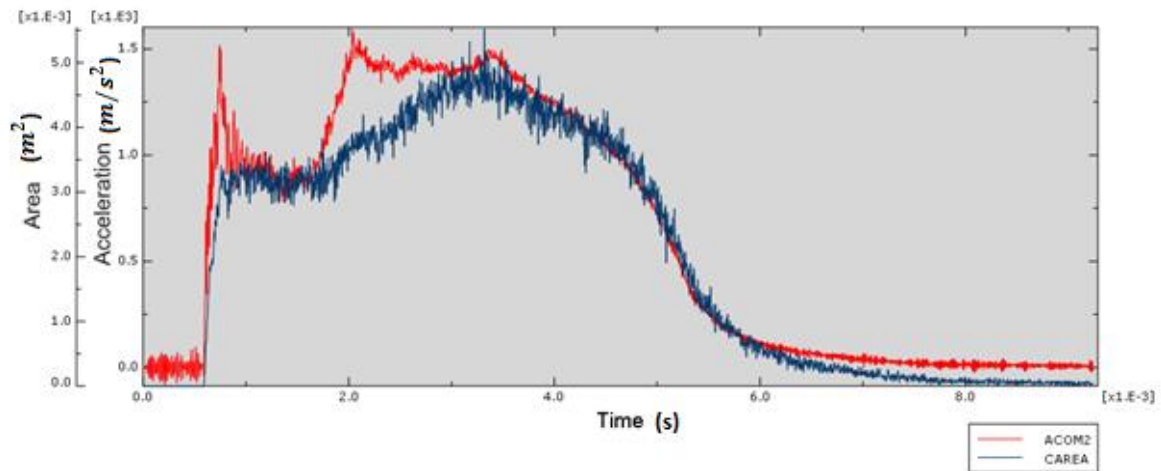


Figura 5.31: Área de contacto (CAREA) y aceleraciones en el eje “y” (ACOM2) para el experimento 1 del modelo 9.

Se puede ver cómo, una vez ha comenzado el impacto, la curva del área de contacto aumenta de forma bastante progresiva. El problema se encuentra en el contacto inicial. Al prescindir de los arcos, el área que entra en contacto una gran cantidad de superficie en el primer instante, produciendo un pico inicial que condiciona el resto de aceleraciones que aparecen durante el impacto, provocando un valor de aceleración máxima de 1541.93 m/s^2 , bastante mayor a la obtenida en los modelos 7 y 8, utilizando una presión menor.

Después de estudiar este modelo, se puede afirmar que en este tipo de airbags “aro”, los arcos abiertos solucionan en cierta medida el problema de los picos repentinos en el área total de superficie que entra en contacto con el suelo, al disminuir los huecos entre uniones, pero funcionan peor a la hora de amortiguar el golpe. Por tanto, si se quieren usar este tipo de airbags en estos sistemas de empaquetamiento protectores, hay que buscar el punto óptimo de apertura de los arcos, en el que se consiga una buena amortiguación del golpe, intentando que los picos en el área sean lo menor posible.

5.10. Modelo 10

Una vez estudiada la variación de los comportamientos según el tipo de arcos que forman los airbags tipo “aro” en su superficie exterior, se prueba otro cambio en la geometría con la intención de disminuir la aceleración máxima que sufre la botella en los modelos anteriores. Este cambio consiste en la disminución del número de estos airbags, haciéndolos más anchos para que cubran la misma zona de la botella que cubrían los de los modelos 7, 8 y 9. Este nuevo modelo consta de veintiún airbags, ocho cubriendo la base de la botella, otros ocho la parte de la boca y cinco de tipo “aro”, protegiendo el resto de la botella como aparecen en la figura 5.32. En este modelo, los airbags tipo “aro” tienen

un ancho de 40 mm y un radio para el arco de 20 mm, con su centro a 40 mm de la botella, formando una sección como la de la figura 5.33.

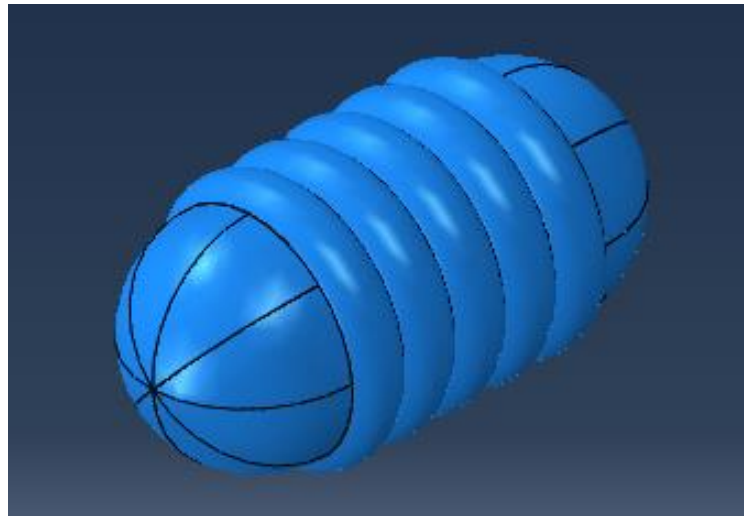


Figura 5.32: Modelo 10.

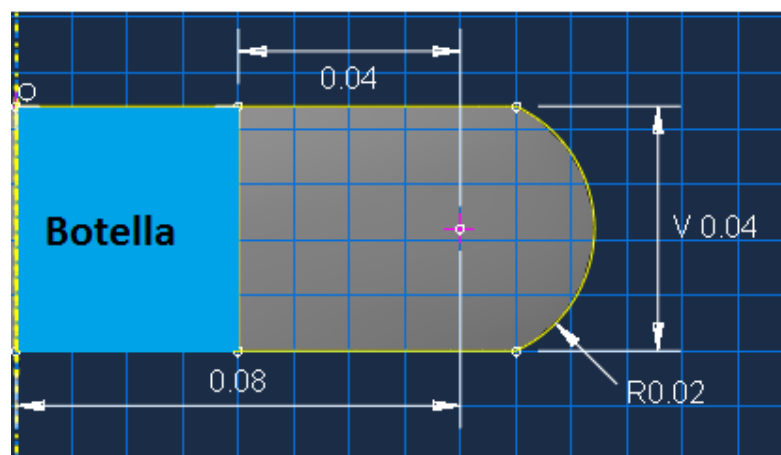


Figura 5.33: Sección airbag tipo “aro” Modelo 10 (m).

5.10.1. Experimento 1 (Modelo 10)

Para comenzar, se realizan distintas simulaciones en las que el conjunto impacta con orientación horizontal, introduciendo en los airbags distintas presiones para encontrar la óptima, que será la que menor aceleración provoque en la botella. Al obtener los resultados de dichas simulaciones se comprueba como este modelo consigue que la botella entre en contacto con el suelo con presiones menores en sus airbags. A partir de 6 KPa la botella deja de golpear el suelo, siendo esta la presión óptima para este modelo, ya que, si se sigue aumentando la presión, las aceleraciones máximas provocadas resultan mayores. Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 5.9. Las aceleraciones obtenidas son las menores conseguidas con este tipo de airbags (tipo “aro”) hasta ahora.

TABLA 5.9: INFLUENCIA DE LA PRESION EN LA ACELERACIÓN; MODELO 10 (EXPERIMENTO 1).

Presión (Pa)	Aceleración max. (m/s^2)
6000	827.825
7000	855.246
10000	893.579

5.10.2. Experimento 2 (Modelo 10)

La presión óptima para este modelo, cuando la orientación de caída es horizontal es de 6 KPa, pero cuando esta orientación es vertical o diagonal los airbags que amortiguan el golpe no son los de tipo “aro”, sino los superiores o inferiores, dependiendo de si la botella cae boca abajo o boca arriba respectivamente. Para el funcionamiento adecuado de estos airbags, en modelos anteriores se vio que era necesario el empleo de una presión mínima de 10 KPa, con lo cual la presión de 6 KPa sería insuficiente. Por ello se prueba a introducir dos valores de presión distintas, dependiendo del tipo de airbags. En los airbags de “aro” se introducirá un valor de presión de 6 KPa y en los demás de 10 KPa. De este modo la botella no contacta con el suelo, pero debido a la desigualdad de presiones a ambos lados de la unión entre los airbags de distinto tipo, aparecen tensiones que provocan la plastificación del material (figura 5.34) haciendo que esta alternativa no sea válida.

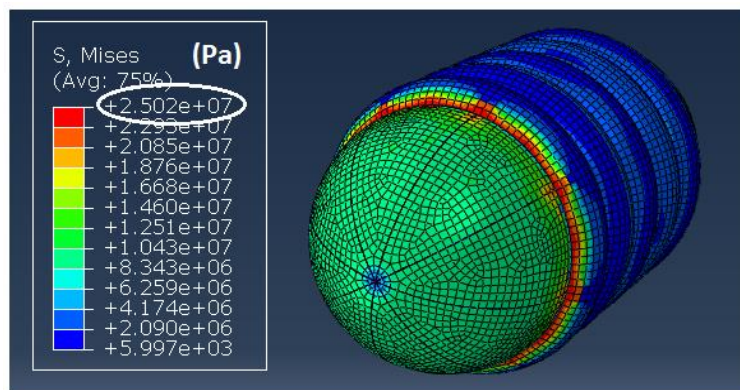


Figura 5.34: Campo de tensiones (Modelo 10, experimento 2).

5.10.3. Experimento 3 (Modelo 10)

Con la intención de evitar la plastificación en los airbags de los extremos como ocurría en el experimento anterior, se aumenta el espesor de membrana de estos que hasta ahora era de 0.1 mm. En primer lugar, se emplea un espesor de 0.3 mm, lo que provoca un aumento de su rigidez, presentando un valor de aceleración máxima de $1119.03 m/s^2$.

En este experimento se estudian caídas diagonales y no verticales ya que en modelos anteriores se ha visto que la posición diagonal es más crítica en este tipo de airbags. Pero con este espesor sigue habiendo plastificación por lo que se decide aumentar el espesor a 0.5 mm consiguiendo una tensión de Von Mises máxima antes del impacto de 20.41 MPa, aceptable con un coeficiente de seguridad de 1.22. La nueva aceleración máxima para este caso en el que ya no se produce plastificación es de 1646.19 m/s^2 .

Empleando presiones y espesores distintos dependiendo de cada airbag, como se ha descrito en el párrafo anterior, se consigue un modelo válido, aunque produce aceleraciones altas. Además, la construcción y el montaje de este modelo sería más complejo que los demás. Por estas razones, y viendo que los airbags de tipo “aro” funcionan correctamente con una presión de 10 KPa, se emplear esta presión en todos los airbags (en lugar de la de 6 KPa), con un espesor de membrana también igual en todos los airbags y de valor 0.1 mm. Con estas características, se obtiene un valor de aceleración máxima de 1116 m/s^2 , menor a las anteriores. Es por ello por lo que se elige como presión óptima para este modelo un valor de presión de 10 KPa, con la cual no se complica la construcción y montaje del modelo con el empleo de presiones y espesores distintos dentro del mismo.

6. Marco regulador

El sistema de empaquetamiento mediante airbags, aunque cada día es más estudiado, actualmente no consta de directivas de aplicación ni normas aplicables. En este capítulo se exponen los pasos y condiciones necesarias para proteger este tipo de estudios.

6.1. Propiedad intelectual de la idea

De acuerdo con la “Ley 24/2015, de 24 de julio, de Patentes”, [30], para la protección de invenciones industriales se consideran tres títulos, modelos de utilidad, patentes de invención y certificados complementarios de protección de medicamentos y de productos fitosanitarios. Este proyecto se encontraría dentro del título de patentes de invención.

Una patente es un título que concede el derecho de explotar en exclusiva el procedimiento o producto patentado. El propietario de dicha patente puede denegar a otros la utilización, venta o fabricación de este producto, pero su patente está a disposición del público para proporcionar conocimiento. La patente puede tratar tanto un producto nuevo como la mejora de uno ya existente, y su duración es de veinte años desde la fecha de presentación de la solicitud, teniendo que pagar tasas anuales para mantenerla en vigor durante este tiempo. Para poder patentar un procedimiento o producto, este debe de cumplir una serie de requisitos y posteriormente hay que llevar a cabo una serie de solicitudes hasta su concesión.¹

6.1.1. Requisitos de patentabilidad

Una invención puede ser patentada si cumple las tres condiciones enumeradas a continuación, [31]:

1. Novedad: dicha invención no puede formar parte del “estado de técnica”, que es la información que se encuentra a disposición del público antes de la fecha de solicitud de patente. Una vez presentada la solicitud, esta invención está protegida por lo que se podrían publicar los resultados del estudio.
2. Actividad inventiva: este requisito se cumple cuando un experto en la materia de la invención que se quiere patentar no es capaz, con sus conocimientos, de llegar a dicha invención de manera fácil y sencilla.
3. Aplicabilidad industrial: el proceso o producto debe de ser producible en cualquier sector industrial.

¹ Las condiciones y plazos posteriores a la solicitud de la patente se encuentran detallados en la página web de la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM), **Fuente especificada no válida.**

6.1.2. Documentación necesaria para presentar la solicitud

Para obtener una patente es necesario presentar la siguiente documentación. Todos estos documentos deben estar redactados en castellano. En las comunidades autónomas con idioma oficial, los documentos podrán redactarse en este idioma, pero acompañados de su traducción al castellano.

- Una instancia dirigida al director de la Oficina Española de Patentes y Marcas. Se trata de un impreso normalizado proporcionado por la propia oficina junto con la carpeta del expediente.
- Una descripción de la invención que se quiere patentar, con dibujos si es necesario.
- Una o varias reivindicaciones. Estas fijan el alcance de los derechos del titular de la patente.
- Un resumen de la invención.

La solicitud de patente, junto a la documentación necesaria, puede presentarse en los registros de cualquier órgano administrativo de la Administración General de Estado, en las Oficinas de Correos o directamente en la Oficina Española de Patentes y Marcas, [32].

7. Entorno socioeconómico

En este capítulo se analiza el entorno social y económico en el que se sitúa el producto diseñado. Este informe no desarrolla un diseño concreto, sino que consiste en un estudio de distintas posibilidades a emplear en la construcción de sistemas de empaquetamiento tolerantes a impactos para la protección de una botella de vidrio.

Como este estudio colabora en la implantación de este tipo de sistemas de empaquetamiento, hasta ahora poco desarrollados, se estudia la posibilidad de su desarrollo e implantación en el sector de packaging (embalaje), analizando la situación económica y social en la que se encuentra España en la actualidad. Además, se describe el impacto medioambiental que este tipo de sistemas de empaquetamiento puede provocar.

Por último, para tener una idea de la inversión que supone el desarrollo de estas nuevas tecnologías, se calcula, con ayuda de la planificación (detallada en el Anexo I), el presupuesto para la realización de este estudio.

7.1. Entorno económico

Tras recuperar el nivel económico, anterior a la crisis económica sufrida durante los últimos años, la industria española de embalaje y envase ha alcanzado, en 2016, la mejor cifra de negocio de la última década [33]. En España, este sector está constituido por 650 compañías, las cuales se dividen en distintos subsectores, dependiendo del material que emplean en la fabricación de sus productos (vidrio, papel y cartón, plástico, madera, metal, etc.) Durante los últimos años estas empresas han aumentado su facturación con una tasa de crecimiento anual compuesto (TACC) del 3.6% (figura 7.1, [34]). Esta TACC mide el rendimiento de una inversión a lo largo del tiempo.



Figura 7.1: TACC del sector de packaging de los últimos años en España (€MM), [34].

Si se tienen en cuenta los datos de facturación, las empresas líderes en este sector son las que emplean cartón ondulado para la fabricación de sus productos (4.867 MM€), y le sigue el subsector del plástico (4.708 MM€). Entre ambos, completan un 47 % de las facturaciones totales del sector en 2016 [33].

Por otra parte, las exportaciones han influido considerablemente en el crecimiento del sector de packaging durante la crisis, provocando incrementos en la facturación de hasta un 5%, [33].

La gran recuperación económica de este sector tras la crisis económica, sumada a su calidad en la mano de obra, ha provocado que la industria española de packaging sea atractiva para inversores de todo el mundo. A esto se añade el cambio en los últimos años del I + D + I (investigación, desarrollo e innovación) clásico, en el cual se invertía en la mejora de productos ya existentes, por un sistema en el que el I + D + I se trata de forma más personalizada para el cliente.

7.2. Entorno social

La industria del packaging se enfrenta en los últimos años al auge del comercio online, en el cual los métodos de envase y embalaje cobran mucha importancia. Hasta el momento, el subsector del cartón es el más cotizado en este comercio, pero el plástico se encuentra en plena fase de crecimiento con el descubrimiento de nuevas técnicas de empaquetado y protección, [34].

Se aprecia cierto interés de inversión en esta industria, sobre todo en subsectores como el cartón y el plástico. Esto es debido principalmente a varias razones:

- El aumento de empresas que quieren personalización en sus productos, lo que las lleva a invertir en métodos y productos propios.
- Demandas de productos desde todos los puntos del país y parte del extranjero, que obliga a las empresas a mejorar sus servicios de transporte e investigar en métodos de empaquetado con la intención de reducir costes.
- El aumento, cada vez mayor del comercio electrónico en el cual todos los productos son entregados mediante repartos y por lo tanto necesitan embalaje.

7.3. Impacto medioambiental

Actualmente la mayoría de los productos alimenticios que se pueden encontrar en el mercado están contenidos en envases de multitud de formas y materiales, pero el material más abundante es el plástico. El plástico tiene multitud de propiedades beneficiosas para este uso como pueden ser su resistencia química y térmica, su efectividad como aislante o como barrera frente al CO_2 y O_2 . Pero estas propiedades hacen que sea un material difícil de reciclar una vez que cumple su función, provocando una acumulación de plásticos en los océanos, que cada vez es mayor, afectando tanto a la fauna como a la flora.

Durante los últimos años, se ha intentado subsanar este problema concienciando a la sociedad sobre lo peligroso que puede llegar a ser y promoviendo el reciclado y la reutilización. Unos de los problemas que tiene el plástico a la hora de ser reutilizado, es que su repetido uso, en contacto con los alimentos, puede provocar la transmisión de partículas tóxicas a dichos alimentos.

Una de las campañas que buscan la solución del problema de los plásticos, promueve la frase “el envase más sostenible es eliminar el envase”, [35], con la que se intenta eliminar el envase en todos los productos alimenticios, recuperando la tradicional venta “a granel”, en la que cada consumidor emplea su propio envase de forma que sea reutilizado cada vez que se compre un producto. De este modo no se eliminan los envases por completo, pero si se pueden reducir. Al ser el plástico un material dañino para la salud cuando se reutilizan envases para contener productos alimenticios se opta por el uso del vidrio, el cual no interfiere con los alimentos y resulta más fácil de reciclar o de degradar en el momento en el que ya no se pueda reutilizar más. Esta campaña se enfoca tanto al consumidor como a las grandes empresas que pueden optar por reutilizar los envases en los que transportan sus productos. El sistema de empaquetamiento presentado en este proyecto favorece el empleo de los envases de vidrio, reduciendo el uso del plástico, que sería utilizado únicamente en la fabricación de los airbags reutilizables.

7.4. Plan de explotación

Después de analizar los distintos aspectos de la sociedad actual, se puede afirmar que en estos momentos la industria del packaging se encuentra en crecimiento con la posibilidad de invertir en nuevos sistemas de empaquetamiento, personalizados para cada empresa. Por otra parte, se busca la reducción de los plásticos mediante la reutilización de envases de vidrio. Es por todo esto por lo que parece un buen momento para investigar en el tipo de sistema de empaquetamiento estudiando en el presente informe. Con este se consigue la protección de botellas de vidrio, evitando su rotura y reduciendo en costes de transporte al emplear menos espacio que los sistemas de protección tradicionales. Esto lo hace atractivo para las empresas, que pueden ver rentable el uso de envases de vidrio para contener sus productos, mejorando la calidad de estos alimentos, además de su imagen y su compromiso con la protección del medioambiente. Estas empresas reducirían el consumo de plástico, empleándolo únicamente para fabricar los airbags protectores, que por otra parte son reutilizables, siempre y cuando no sufran grandes daños.

Para conocer mejor las posibilidades de implantación de este sistema de empaquetamiento resistente a impactos, resulta útil emplear una herramienta para examinar distintos aspectos del producto estudiado (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades), llamada DAFO, [36], como la de la tabla 7.1.

TABLA 7.1: DAFO DEL SISTEMA DE EMPAQUETAMIENTO MEDIANTE AIRBAGS.

DEBILIDADES	FORTALEZAS
<ul style="list-style-type: none"> - Producto poco conocido. - Utilización de plástico, material cuyo uso se quiere reducir. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ayuda a la reducción de costes y diferenciación en las empresas que lo utilicen. - Posibilidad de reducir los costes de estudios posteriores, debido a la experiencia ganada.
AMENAZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> - Falta de reglamento y normativa para su fabricación y empleo. - Fácil de copiar por otros competidores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mercado en pleno crecimiento. - Publicidad positiva al colaborar con la reducción del uso de envases nuevos. - Compromiso social, mejorando la calidad de los productos envasados.

7.5. Planificación

En el caso de proyectos en los cuales se incluyen varias actividades, una buena planificación inicial ayuda a facilitar la organización y a llevar un orden en el momento de realizar dichas actividades. De esta forma se pueden optimizar los recursos presentes, ahorrando tiempo y costes. La etapa de planificación se puede dividir en cinco pasos claves, [37]:

1. Análisis del proyecto: en este se realiza un diagnóstico de la relación entre el proyecto y el sector en el que se desea implantar. Para ellos se lleva a cabo una recopilación de información sobre antecedentes relacionados con el proyecto y sobre el estado socioeconómico en el que se encuentra el sector.

En el capítulo dos del presente informe se presenta un análisis sobre los antecedentes en sistemas de empaquetamiento y se analiza la situación socioeconómica del sector de packaging, evaluando las posibilidades de implantación del tipo de sistema de empaquetamiento tratado en este estudio.

2. Definición de objetivo: este paso resulta importante, ya que antes de comenzar con el proyecto hay que tener claro que se quiere hacer y a donde se quiere llegar. Cabe la posibilidad de cambiar estos objetivos según se avanza en el desarrollo del proyecto.

Este paso también es útil para evaluar el proyecto una vez finalizado, viendo si se han alcanzado o no los objetivos propuestos.

Para el desarrollo de este proyecto, se proponen unos objetivos, presentados en el capítulo uno, junto a la motivación que justifica la realización de este estudio.

3. Identificación de recursos: una vez se sabe de qué trata el proyecto y a dónde se quiere llegar, es necesario identificar los recursos de los que se dispone (humanos, tecnológicos, económicos, etc.) y administrarlos de forma óptima. Para la realización de este proyecto se cuenta con la posibilidad de usar una herramienta potente en el entorno de cálculo mediante el método de elementos finitos como es Abaqus®. En los capítulos tres y cuatro se habla sobre este software y su aplicación en el presente estudio.
4. Plan de trabajo: esta es una de las fases decisivas en el proyecto. Consiste en la elaboración de un programa determinando fechas y plazos para cada una de las tareas en las que se subdivide el proyecto. Una buena organización y cumplimiento de este programa, puede proporcionar una disminución de costes considerable, al aprovechar de la forma más adecuada el tiempo de trabajo. Este programa es flexible, permitiendo cambios durante la ejecución del proyecto.

En el presente estudio se ha diseñado un diagrama de Gantt para organizar su planificación. Este proyecto se divide en cuatro tareas principales, aprendizaje, para conocer el software empleado y las herramientas de las que dispone, búsqueda de información, ejecución de las simulaciones y obtención e interpretación de los resultados y finalmente redacción del informe. En dicho diagrama, adjuntado en el Anexo I, se presentan estas tareas con mayor grado de detalle, junto a las fechas y plazos para su realización.

5. Valoración de los resultados: esta es la última fase del proyecto. En ella se comparan los resultados obtenidos con los objetivos propuestos al principio, obteniendo conclusiones y verificando si resulta viable o no su implantación.

En el capítulo siete se exponen las conclusiones obtenidas durante este estudio, junto a posibles trabajos futuros.

7.6. Presupuesto

A continuación, se detalla el presupuesto de este proyecto, teniendo en cuenta el tiempo de trabajo, tanto del alumno como del tutor, y la amortización de las herramientas empleadas. En este caso se utiliza un ordenador personal y una licencia del software Abaqus®, proporcionada por la universidad.

7.6.1. Horas empleadas

A partir del diagrama adjuntado en el Anexo I, se obtiene la tabla 7.2 en la que realiza el recuento de días empleados para cada tarea, y las horas diarias medias que conllevan.

El total de días en esta tabla es mayor al total de días empleados en llevar a cabo el proyecto, ya que hay días en los que se realiza más de una tarea. Sin embargo, las horas totales si son correctas, al contar las horas diarias empleadas en cada tarea y no las empleadas en el proyecto como conjunto.

TABLA 7.2: TAREAS LLEVADAS A CABO Y HORAS EMPLEADAS.

	Etapas proyecto	Duración (días)	Media de horas diarias (h)	Horas (h)
1	Aprendizaje			
1.1	Sesión 1	1	2	2
1.2	Sesión 2	1	2	2
1.3	Sesión 3	1	2	2
1.4	Sesión 4	1	2	2
1.5	Practica Abaqus	11	2	22
1.6	Practica ejemplo	8	3	24
1.7	Practica ejemplo botella	6	4	24
2	Búsqueda de información			
2.1	Antecedentes	7	2	14
2.2	Motivación	5	2	10
2.3	Metodología	5	2	10
2.4	Descripción del modelo	3	2	6
2.5	Entorno socioeconómico	3	2	6
2.6	Marco regulador	3	2	6
3	Simulaciones			
3.1	Diseño	49	4	196
3.2	Ejecución computacional	49	8	392
4	Informe			
4.1	Antecedentes	19	2	38
4.2	Motivación	12	2	24
4.3	Metodología	16	2	32
4.4	Descripción del modelo	9	2	18
4.5	Resultados	18	2	36
4.6	Entorno socioeconómico	3	4	12
4.7	Marco regulador	2	4	8
4.8	Otros capítulos	2	5	10

4.9	Correcciones	3	2	6
5	Tutorías	6	2	12

Horas totales (h)	914
Horas alumno (h)	522
Horas ordenador (h)	392
Horas profesor (h)	20

7.6.2. Costes

Una vez calculadas las horas empleadas para la realización del proyecto, se pueden calcular los dos costes que forman el coste total. Estos son el de amortización y el de personal.

Los costes de amortización se deben al uso del ordenador y de la licencia del software Abaqus®, [38]. Para el cálculo de dicho coste se puede emplear la ecuación 7.1, [39].

$$C_{amort} = \left(\frac{V_c - V_r}{T} \right) \times H \times \frac{U}{100} \quad (7.1)$$

En esta ecuación, C_{amort} se refiere al coste de amortización, V_c al coste inicial de la herramienta que se amortiza, V_r es el valor residual, que en los casos de este proyecto es considerado cero, T los meses de vida o el tiempo en el que se puede usar esta herramienta, H los meses que ha durado la realización del proyecto y U es el porcentaje de uso dedicado al proyecto durante estos meses.

En la tabla 7.3 se muestran los datos necesarios para aplicar la ecuación 7.1 para el ordenador y el software utilizados durante el proyecto, junto a los costes de amortización de cada uno.

TABLA 7.3: COSTES DE AMORTIZACIÓN.

Herramienta	V_c (€)	T (Meses)	H (Meses)	U (%)	C_{amort} (€)
Ordenador	1000	36	4	95	105.56
Abaqus	33650	12	4	100	11216.67
Costes totales de amortización (€)					11322.23

El coste de personal se puede calcular con las horas de trabajo obtenidas en el subcapítulo 7.6.1, aplicando el coste por hora adecuado para cada miembro como se adjunta en la tabla 7.4.

TABLA 7.4: COSTES DE PERSONAL

Personal	Coste(€/h)	Dedicación (h)	$C_{personal}$ (€)
Tutor	40	20	800
Autor	15	522	7830
Costes de personal totales (€)			8630

Una vez calculado los dos tipos de costes aplicados a este tipo de proyectos, se puede calcular el presupuesto como la suma de ambos (ecuación 7.2), en la cual $C_{Totales}$ será el presupuesto final, $C_{amort,T}$ los costes totales de amortización y $C_{Personal,T}$ los costes totales de personal.

$$C_{Totales} = C_{amort,T} + C_{Personal,T} = 11322.23 + 8630 = 19952.23 \text{ € (7.2)}$$

El presupuesto final de este proyecto asciende a la cantidad de **diecinueve mil novecientos cincuenta y dos euros y veintitrés céntimos**.

8. Conclusiones y trabajos futuros

En el capítulo ocho se exponen las conclusiones obtenidas, los objetivos cumplidos y algunas propuestas que se pueden realizar en trabajos futuros.

8.1. Conclusiones

Durante el transcurso de este proyecto, se han adquirido una gran cantidad de conocimientos valiosos sobre el método de cálculo basado en elementos finitos y sus aplicaciones. Se ha obtenido experiencia en el uso del software Abaqus®, aumentando la agilidad y rapidez para diseñar distintos modelos, además de alcanzar conocimientos suficientes como para poder realizar simplificaciones en estos modelos, con la seguridad de que sean aceptables. Se logran distintos modelos válidos, en los que la botella no se rompe, y las hipótesis adecuadas con las que intuir el motivo de fallo de los modelos no válidos, pudiendo así modificarlos y conseguir solucionar el problema.

También se han comprobado posibles simplificaciones validas a la hora de estudiar el comportamiento de la geometría del conjunto, pudiendo realizar diseños en los que solo se incluyan y se ensayen algunos de los airbags de los que forman el conjunto total. Los valores de los resultados de estas simulaciones son simplemente ilustrativos. Las formas de sus graficas son semejantes a las que se obtendrían si el modelo estuviese formado por todo el conjunto de airbags, pudiendo así tener una idea del comportamiento final del modelo, con un ahorro tanto de tiempo de cómputo, a la hora de realizar el diseño, como de tiempo computacional, para calcular los resultados.

Después de realizar las distintas simulaciones, cambiando varios parámetros de los airbags, y comparar los resultados obtenidos, se pueden apreciar algunos patrones de comportamiento y consideraciones a tener en cuenta al realizar nuevos estudios sobre este tipo de empaquetamientos. A continuación, se enumeran estos patrones y consideraciones.

1. Cuanto mayor sean los espesores de las cavidades de los airbags, menor es la presión necesaria en su interior para que la botella no contacte con el suelo, ya que el espacio que queda entre la botella y el suelo al comenzar el impacto es mayor. Esto hace que el conjunto de airbags sea menos rígido y amortigüe mejor el golpe, provocando menores aceleraciones en la botella. Es por esto por lo que se requiere detectar los lugares en los que este espesor sea mínimo y simular un impacto sobre esta zona. Por ello se ha decidido realizar distintos experimentos para cada modelo, variando la orientación de caída y no analizar únicamente una orientación, como se proponía en los objetivos iniciales. Los grandes espesores de cavidad consiguen un aumento lento del área de contacto entre el conjunto y el suelo, lo que produce valores menores en las aceleraciones sufridas por la botella. El inconveniente del empleo de estos espesores es el aumento del espacio necesario cuando se quieren trasladar las botellas y el respectivo aumento en costes transporte.

2. El aumento de la presión introducida en los airbags disminuye las posibilidades de que la botella toque el suelo, pero produce un aumento en la rigidez del conjunto de airbags, lo que provoca un aumento en la aceleración sufrida por la botella. Para todos los modelos aceptables hay un valor de presión óptimo con la cual la botella no entra en contacto con el suelo y a partir de la cual el conjunto de airbags aumenta su rigidez. Una presión excesiva puede llevar al material de los airbags a plastificar.
3. El uso de espesores de membrana grandes disminuye las tensiones sufridas por los airbags, alejando la posibilidad de sufrir plastificación material. Por otra parte, el aumento de estos espesores también provoca un aumento en la rigidez del sistema de empaquetamiento, produciendo además mayores costes de materia prima a la hora de fabricarlos. Por ello, el empleo de grandes espesores solo se lleva a cabo cuando las tensiones en los airbags se acercan demasiado a la tensión de plastificación del material.
4. Se obtienen mejores comportamientos en geometrías que favorecen un contacto progresivo entre los airbags y el suelo. Si se producen aumentos repentinos del área total de contacto, se producirán también aumentos proporcionales en la aceleración. Las geometrías cilíndricas son las que mejor consiguen esta progresividad.
5. Si se usan los airbags denominados como “longitudinales” en este estudio, en impactos horizontales, las aceleraciones obtenidas pueden variar según la orientación horizontal con la que impacte el conjunto. Esta variación se puede disminuir aumentando el número de airbags, dejando huecos menores en sus uniones.
6. En los airbags que presenten geometrías exteriores con forma de arco (en este estudio se han llamado longitudinales y tipo “aro”), cuanto más abierto sea este arco, más progresivo será el aumento del área de contacto, disminuyendo las aceleraciones máximas, pero empeorando la capacidad de amortiguación del conjunto, lo que provoca un aumento de estas aceleraciones. Hay que encontrar el punto óptimo, en el que se consiga la menor aceleración máxima, variando estos dos parámetros.
7. Hay geometrías para los airbags, como las cilíndricas, que consiguen una progresión adecuada en el aumento del área de contacto entre el conjunto y el suelo, en impactos horizontales, pero en las cuales su contacto inicial es tan grande que provoca una aceleración inicial que hace que los valores de aceleraciones posteriores sean altos. Se trata de conseguir un aumento del área de contacto progresivo y lo más lento posible, con el mínimo contacto inicial.
8. Cuando un conjunto de airbags forma una geometría específica, cuanto mayor sea el número de airbags que lo forman, mayor será su rigidez, siempre que el conjunto total de los airbags ocupe el mismo espacio y forme la misma geometría.

Una vez se ha realizado el estudio de la actuación de los sistemas de empaquetamiento mediante airbags y se ha analizado el punto en el que se encuentra la sociedad actual y cuáles son los métodos de empaquetamiento más empleados, se puede afirmar la

viabilidad en la implantación de este tipo de sistemas en muchas de las operaciones de empaquetado futuras. El sector de packaging se encuentra en plena fase de crecimiento, resultando atractivo para inversores, no que lleva a un aumento en el I + D + I, que por otra parte cada vez se centra más en la personalización para cada empresa. A esto hay que añadirle las nuevas propuestas medioambientales que promueven la reutilización de envases y la disminución del uso de plásticos. Dado que los envases más adecuados para su reutilización en el sector alimenticio son los envases de vidrio, por sus propiedades, parece interesante contar con la opción de poder transportar dichos envases, asegurando su integridad y ocupando poco espacio, disminuyendo así los costes debidos al transporte. De esta forma se destina el uso de los plásticos únicamente para la fabricación de estos airbags, que por otro lado son reutilizables, contribuyendo así a la propuesta medioambiental de reutilización y reducción de plásticos.

8.2. Trabajos futuros

Este proyecto se ha dado por finalizado después de obtener varias conclusiones y patrones de comportamiento en la disposición de airbags que protegen una botella de vidrio. Durante la realización de este estudio se han adquirido conocimientos y experiencia, que hacen más fáciles y rápidas las ampliaciones futuras en estudios similares. En este capítulo se exponen propuestas de mejora en el sector de los sistemas de empaquetamiento mediante airbags, que parecen factibles e interesantes.

8.2.1. Mejora de la gestión de apilado

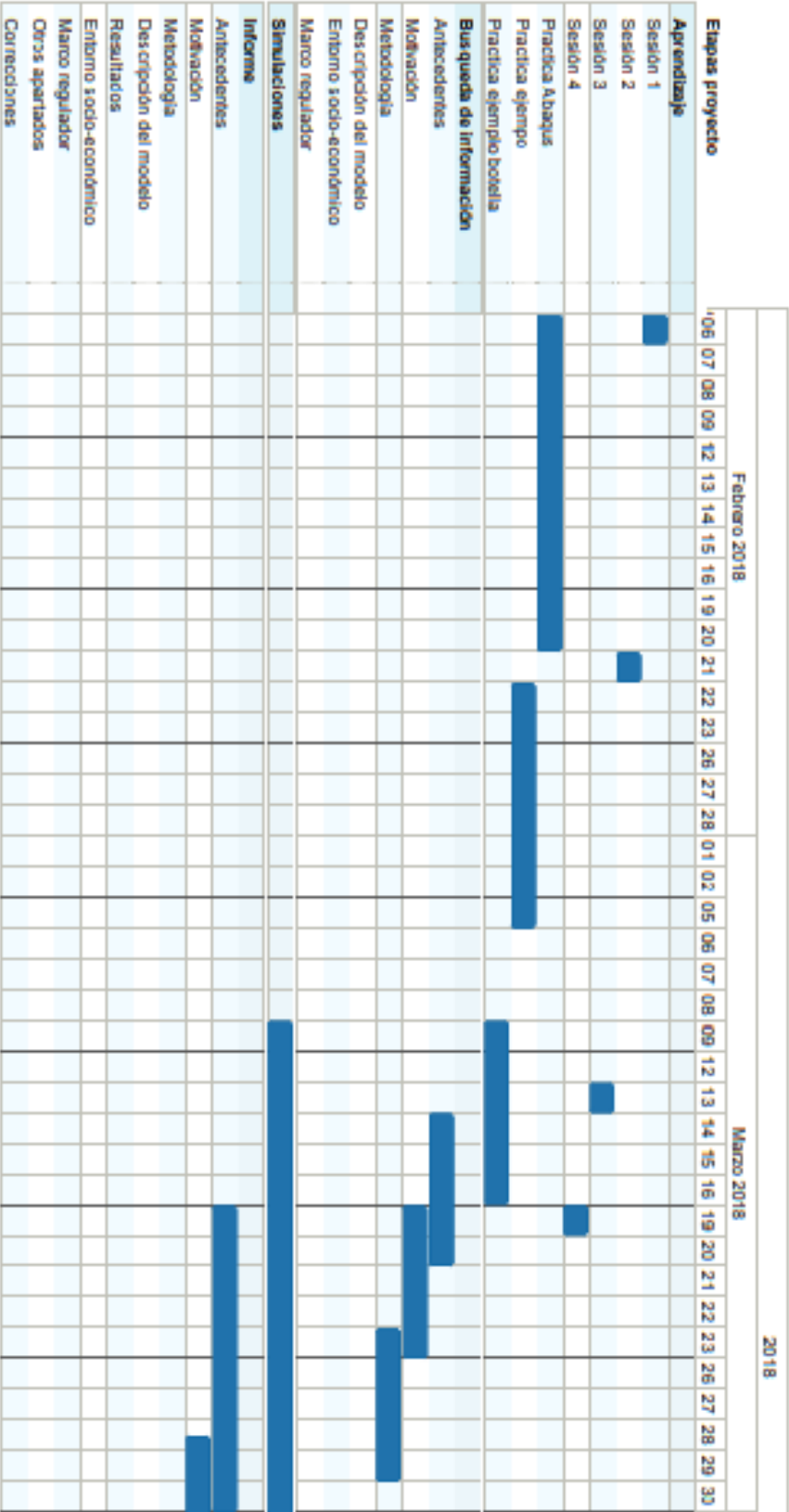
Una de las ventajas de este tipo de empaquetamiento es la necesidad de poco espacio para conseguir la protección de la botella, pero en los modelos presentados no se tiene en cuenta el ahorro de espacio mediante la forma de apilado. Se propone el estudio de un modelo, cuya geometría permita apilar varios de forma que no exista espacio entre ellos, sin dejar de lado la protección de la botella.

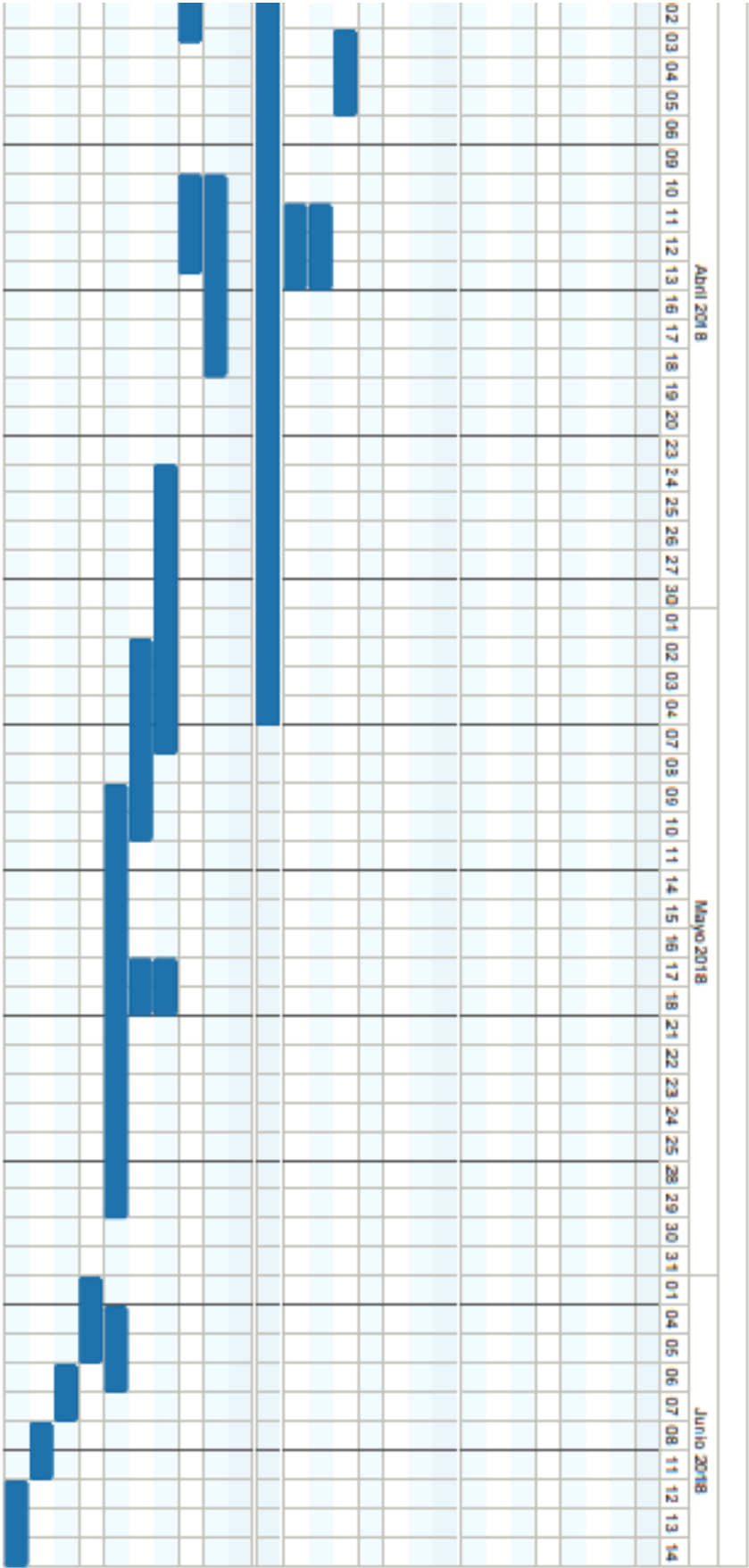
8.2.2. Contenedores para botellas.

En el estudio realizado de empaquetan las botellas individualmente, necesitando un sistema complementario para poder trasladar varias a la vez. Para facilitar este traslado, sin necesidad de sistemas complementarios, se propone el estudio de un contenedor, formado por airbags, en el que se puedan introducir varias botellas a la vez. Este conjunto de airbags y botellas se puede estudiar de la misma forma que se ha hecho con los modelos individuales, pero teniendo en cuenta además la protección contra posibles choques entre botellas, y no solo contra el suelo. En este modelo convendría asegurar que el material de los airbags no plastifique durante el golpe y no solo antes de este, como se hacía con los individuales. Cuando se trata de un pequeño conjunto de airbags, se puede asumir el desecho de estos, si reciben un daño importante que impida su reutilización, pero en el caso de los contenedores, es preferible el empleo de más material, asegurando su integridad en el caso de recibir impactos fuertes. Desechar en contenedor entero cada vez

que este reciba un golpe, produciría un aumento de desechos plásticos considerable, cuando uno de los objetivos de este sistema de empaquetamiento es reducirlos.

ANEXO I: DIAGRAMA DE GANTT





REFERENCIAS

- [1] R. Geyer, J. R. Jambeck y K. Lavender Law, «ScienceAdvances,» 19 Julio 2017. [En línea]. Disponible en: <http://advances.sciencemag.org/content/3/7/e1700782>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [2] Redacción BBC Mundo, «BBC Mundo,» 11 Diciembre 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-42304901>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [3] F. Maviglia, S. Balzarotti, F. Biassoni y M. R. Ciceri, «ScienceDirect,» Procedia Manufacturing, vol. 3, pp. 2251-2258, 23 Octubre 2015.
- [4] D. A. Rico Avellaneda y M. Villamizar, «Empaques y embalajes para exportación,» Bogotá.
- [5] FedEx, «Cómo Embalar,» España, 2016.
- [6] A. Dawes, «Los peligros del hielo seco,» 01 Febrero 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.geniolandia.com/13148547/los-peligros-del-hielo-seco>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [7] «IATA,» 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.iata.org/publications/store/Pages/airport-handling-manual.aspx>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [8] «IACO,» 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaco.es/>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [9] «EMBAMAT,» 2017. [En línea]. Disponible en: <http://embamat.eu/es/productos/embalajes/relleno-y-acolchado>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [10] «ULINE.mx,» [En línea]. Disponible en: https://es.uline.mx/BL_2171/Cool-Shield-Bubble-Rolls-and-Pallet-Covers. [Último acceso: Marzo 2018].
- [11] «TotalSafePack,» 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.totalsafepack.com/>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [12] «RAJAPACK,» 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.rajapack.es/blog-es/productos/cajas-para-enviar-botellas-de-vino-o-cava/>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [13] «PACKabc,» [En línea]. Disponible en: <https://www.abc-pack.com/productos/caja-para-2-botellas-de-vino-o-cava/>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [14] R. Interempresas, «Industria Vinícola,» 29 Septiembre 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Vitivinicola/Articulos/196190-Embalajes-innovadores-para-botellas-de-vino-y-licores.html>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [15] I. Urbina Polo, «DI-CONEXIONES,» 15 Junio 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.di-conexiones.com/vinnibag-una-bolsa-inflable-para-transportar-objetos-fragiles/>. [Último acceso: Marzo 2018].

- [16] «BOTTELO,» 2017. [En línea]. Disponible en: <https://bottelo.es/wineskin/>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [17] «AliExpress,» [En línea]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/w/wholesale-inflatable-wine-bag.html>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [18] «Grupo Carman,» 18 Junio 2013. [En línea]. Disponible en: <http://grupocarman.com/blog/solidworks-simulation/>. [Último acceso: Abril 2018].
- [19] «Conceptos básicos del Método por Elementos Finitos,» [En línea]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2548/011-MPM-Cap8-Final.pdf?sequence=11>. [Último acceso: Abril 2018].
- [20] R. D. Mindlin, «Dynamics of Package Cushioning,» *Bell System Technical Journal*, vol. 24, n° 3, pp. 353-461, Julio-Octubre 1945.
- [21] Fu-de Lu, Wei-ming Tao y De Gao, «Virtual Mass Method for Solution of Dynamic Response of Composite Cushion Packaging System,» *Packaging Technology and Science*, vol. 26, 1, pp. 32-42, 2013.
- [22] «Propiedades del vidrio,» [En línea]. Disponible en: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/es/glosario/propiedades-del-vidrio>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [23] M. H. Chaudhry, *Applied Hydraulic Transients*, Carolina, USA: Springer, 2014.
- [24] D. V. Doval, «Estudio experimental y numérico de Comportamiento de tanques integrados de combustible frente a impacto de alta velocidad,» Leganés, 2009.
- [25] M. Ashby, *Materiales para ingeniería 1. Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño (Vol. 1)*, Reverté, 2008.
- [26] «INTPKG,» [En línea]. Disponible en: <http://www.intpkg-cn.com/Customized-air-bag-packaging-p67.html>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [27] «Abaqus/CAE User's Manual,» [En línea]. Disponible en: <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/books/usi/default.htm>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [28] [En línea]. Disponible en: http://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node27.html. [Último acceso: Mayo 2018].
- [29] L. Laim y J. P. C. Roberts, «Análise numérica do comportamento estrutural de vigas em aço enformado a frio,» de *Conference: 8º Congresso de Construção Metálica e Mista*, (ISBN: 978-989-95605-2-9), At Guimarães, 2011.
- [30] Ley 24/2015, de 24 de julio, de Patentes, 2015.

- [31] P. y. m. PROTECTIA, «¿Cuáles son los requisitos de patentabilidad de una invención?,» 16 Abril 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.protectia.eu/patentes/requisitos-patentabilidad-invencion/>. [Último acceso: Junio 2018].
- [32] UPM, «Procedimiento general de concesión de patentes,» 2011.
- [33] M. D. Herranz, «Hispack 2018,» 7 Mayo 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.hispack.com/press-releases/-/prensa/detalle/12187779/la-industria-del-packaging-espanola-factura-20-000-millones-de-euros>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [34] J. V. d. Seoane, «Coordenadas BDO,» 21 Mayo 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.bdo.es/es-es/blogs-es/blog-coordenadas-bdo/mayo-2018/retos-del-sector-del-packaging-en-ecommerce>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [35] «Packaging y sostenibilidad,» 16 Agosto 2016. [En línea]. Disponible en: <http://aranda-estudio.com/packaging-y-sostenibilidad/>. [Último acceso: Junio 2018].
- [36] I. Calsina, P. Carvajal, J. L. Cayola, P. Ceballos, R. Fernández y F. Fernández, «Plan de negocio,» Sevilla, 2012-2013.
- [37] «OBS Business School,» 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.obs-edu.com/es/blog-project-management/etapas-de-un-proyecto/5-pasos-clave-en-la-etapa-de-planificacion>. [Último acceso: Junio 2018].
- [38] «Universidad Carlos III de Madrid,» 19 Febrero 2010. [En línea]. Disponible en: http://portal.uc3m.es/portal/page/portal/perfil_contratante/perfil_contratante_procedimientos_negociados/Licencia%20permanente%20del%20programa%20ABAQUS. [Último acceso: Junio 2018].
- [39] «Cómo calcular el coste / hora de mi maquinaria,» [En línea]. Disponible en: <https://www.agroptima.com/blog/como-calcular-el-coste-hora-de-mi-maquinaria/>. [Último acceso: Junio 2018].

